The Role of Astronomical Instruments in Arms Control Verification

by

Chris A. Rutkowski
University of Manitoba

prepared for

The Arms Control and Disarmament Division

Department of External Affairs
Ottawa, Ontario, Canada

Arms Control Verification Studies, No. 2

86-06007/

Probably the first astronomical instrument used in Canada, the astrolabe of Samuel de Champlain, the father of New France and hence of Canada, was lost on a journey of exploration near Ottawa in 1613. Some 254 years later, in 1867, it was recovered and is commemorated in the statue represented on the cover, which stands in the shadow of Parliament Hill overlooking the Ottawa River.

The graphic on the cover page represents the ongoing dialogue on arms control and disarmament issues in Canada and between Canadians and the world community.

Arms Control Verification Studies

Arms Control Verification Studies are issued periodically by the Arms Control and Disarmament Division of the Department of External Affairs. Their purpose is to disseminate the results of independent research undertaken for the Department of External Affairs as part of ongoing work by the Department in this area.

The views expressed in these reports are those of the authors and do not necessarily represent those of the Department of External Affairs or of the Government of Canada.

Vous trouverez un résumé en français de la présente étude à la page i de ce document.

On peut se procurer une version française de cette étude en écrivant à l'adresse suivante :

Direction du contrôle des armements et du désarmement
Ministère des Affaires extérieures
Tour A, 6e étage
125, promenade Sussex
Ottawa (Ontario)
Canada
K1A 0G2

The Role of Astronomical Instruments in Arms Control Verification

by

Chris A. Rutkowski
University of Manitoba

prepared for

The Arms Control and Disarmament Division

Department of External Affairs
Ottawa, Ontario, Canada

© Department of External Affairs
September 1986
ISSN 0828-3664

Table of Contents

		Page
Abstract		i
Résumé		i
Introduction		ii
Chapter One:	Visual Observations of Satellites	1
Chapter Two:	Photographic Observations of Satellites	2
Chapter Three:	Photometric Observations of Satellites	3
Chapter Four:	Ground-Based Electro-Optical Deep Space Surveillance (GEODSS)	4
Chapter Five:	Resolution of Space Objects	7
Chapter Six:	Space-Based Weapons	9
Chapter Seven:	Verification of Space Systems	12
Chapter Eight:	Summary	14
Chapter Nine:	Canada and Ground-Based Systems for Space Verification	15
Appendix 1:	Satellite Tracking Sites	16
Appendix 2:	Major Canadian Astronomical Institutions	17

Abstract

Astronomical instruments and methods have become increasingly used in military space research. It is also quite possible to use these same techniques for verifying arms control agreements related to space-based weapons and ground-based deployment of troops and weapons.

Early satellite tracking programs are described, including: "MOONWATCH" which involved the use of civilians making visual observations, the Baker-Nunn camera system, photometric observation systems and the Ground-Based Electro-Optical Deep Space Surveillance (GEODSS) system. There follows a short section outlining the resolution potential of various optical and radar systems.

The author then discusses developments in the area of space-based weapons, including Fractional Orbital Bombardment Systems (FOBS) as well as Directed Energy and other Anti-Satellite (ASAT) weapons. International agreements relating to the militarization of space are reviewed and the role of ground-based and space-based systems for monitoring these and other treaties is reviewed.

Among the author's observations are:

1. Satellite tracking is likely to become more important as the military use of space increases.
2. Proposals for arms control verification in space should include the use of technology at the same level as the systems to be verified.
3. As Baker-Nunn cameras used by the military are replaced by electro-optical systems, their transfer to astronomical institutions would be useful in the development of verification techniques in the academic sector.
4. Spin-offs from military astronomical technology development should be realized by scientific institutions for asteroid tracking, binary-star resolution, quasar studies and other projects.
5. Canada stands in a good position to contribute to ground-based verification studies on an international scale and possesses the necessary technical means, manpower and facilities to remain in such a position for the long term.
6. If additional GEODSS stations were to be established, it would be useful to consider Canada as a possible site.
7. Canadian astronomy, one of Canada's most prized scientific strengths, has been undermined by lack of modern equipment. If Canada participates in advanced technology projects, one spin-off advantage of such participation could be the application of astronomical technology to the verification of arms control agreements.

Résumé

L'emploi des instruments et des méthodes astronomiques se répand dans la recherche spatiale à des fins militaires. En outre, il y a de nombreuses possibilités d'application de ces mêmes techniques à la vérification des accords de contrôle des armements ayant trait aux armes basées dans l'espace ainsi qu'au déploiement terrestre de troupes et d'armes.

L'auteur décrit les premiers programmes de poursuite des satellites, dont le réseau «Moonwatch», qui prévoyait des observations visuelles par des civils, le système de caméra Baker-Nunn, les réseaux d'observation photométriques et le système de Surveillance terrestre électro-optique de l'espace lointain (GEODSS = Ground Based Electro-Optical Deep Space Surveillance). Suit alors une brève section sur la capacité de résolution de divers systèmes optiques et radars.

L'auteur examine ensuite l'évolution des armes basées dans l'espace, notamment les systèmes de bombardement à orbite fractionnaire (FOBS = Fractional Orbital Bombardment Systems) ainsi que les armes à énergie dirigée et autres armes anti-satellites (ASAT), puis il passe en revue les accords internationaux concernant la militarisation de l'espace et examine le rôle que jouent les systèmes terrestres et spatiaux dans la surveillance de ces accords et autres traités.

Voici quelques-unes des conclusions de l'auteur :

1. La poursuite des satellites prendra vraisemblablement plus d'importance à mesure qu'augmentera l'utilisation de l'espace à des fins militaires.
2. Des propositions visant la vérification du contrôle des armements dans l'espace devraient comprendre l'utilisation de la technologie sur le même plan que les systèmes devant être vérifiés.
3. Vu que les caméras Baker-Nunn qui étaient utilisées à des fins militaires sont remplacées par des systèmes électro-optiques, leur transfert à des établissements se spécialisant dans le domaine de l'astronomie serait fort utile à la mise au point de techniques de vérification dans le secteur académique.
4. Les institutions scientifiques devraient pouvoir profiter, à partir de la technologie astronomique militaire, de retombées pour la poursuite des astéroïdes, la résolution des étoiles binaires, l'étude des quasars et d'autres projets.
5. Le Canada est bien placé pour contribuer aux études sur la vérification à partir de la Terre, à l'échelle internationale; il possède les moyens techniques, la main-d'oeuvre et les installations nécessaires pour garder cette position de façon permanente.
6. Si de nouvelles stations GEODSS étaient mises sur pied il serait bon de considérer le Canada comme site éventuel.
7. L'astronomie canadienne, l'un de nos atouts scientifiques les plus précieux, manque de matériel moderne. Si le Canada participe à des projets de technologie avancée, une des retombées de cette participation serait l'application de la technologie astronomique à la vérification des accords sur le contrôle des armements.

Introduction

The space age is said to have begun when the first Sputnik was launched in 1957. Since then, many payloads have been orbited. The present number of objects in orbit is about 5,000.

With the deployment of satellites and space platforms for military use, astronomers have found their previously uncontested domain "invaded" for non-scientific purposes. Because many applications involve observational techniques, it is not surprising that astronomical instruments and methods have become increasingly used in military space research.

Along with the military aspects of astronomy comes the possibility of using these same techniques to aid in the verification of space-based weapons systems and the ground-based deployment of troops and weapons. This possibility shows some promise, with certain limitations dependent on arms control agreements and defence policies.

Chapter One

Visual Observations of Satellites

In July 1956, the Smithsonian Astrophysical Observatory (SAO) issued its first *Bulletin for Visual Observers of Satellites* as an introduction to amateur astronomers registered in its then unnamed visual observing program. Eventually called MOONWATCH, the program was initiated to assist the SAO in the preliminary tracking of satellites launched during the International Geophysical Year. Although Baker-Nunn telescopes were at that time under development for photographic tracking, the initial orbital path was needed before the Baker-Nunns could be employed. Radio tracking was also used when possible, although the failure of instrument packages was expected, and optical techniques were employed to relocate "lost" satellites. Optical observations of satellites were thus a necessary part of early satellite tracking.

The advent of the Soviet Union's Sputnik in October 1957 showed how valuable the MOONWATCH program really was. In its Bulletin for March 1958, its Associate Director, J.Allen Hynek (best known, ironically, for his involvement in "UFO" research) commented that "the unexpected appearance of the Russian Sputniks and their high inclinations to the equator have made it necessary for MOONWATCH teams to act as interim tracking stations until our full complement of precision satellite tracking cameras is in position".[1] In fact, the problem was somewhat more complicated. The Russian launches were at precisely the "wrong" orbital inclination for many MOONWATCH stations and those Baker-Nunn cameras already in position. Stations were thus quickly set up to accommodate the higher orbital inclinations.

Optical observations tend to be more accurate in principle than radio measurements because of ionospheric distortion, although compensatory mechanisms are used for radio tracking. Removing human error from observation greatly improves the accuracy, of course, so the development of Baker-Nunn cameras was a major step forward. The MOONWATCH program, however, was not officially disbanded until June 30, 1975, having been phased out in stages over the years. MOONWATCH provided a wealth of valuable data during its operation; probably the most notable was the observation of the re-entry and the recovery of Sputnik 4 on September 5, 1962, over Wisconsin. Other data for MOONWATCH came from the Volunteer Flight Officers Network, whereby airline personnel made over 4,000 observations of satellites and meteors.[2]

At its termination, MOONWATCH still had 100 active stations. It was described as the least expensive part of the space program, utilizing only $14 million for the duration of its operation. This is significant, especially since it was originally intended to operate for only 18 months. Instead it operated for 18 years, giving valuable information on satellites throughout its existence.[3]

Some note should also be made of the amateur radio tracking of satellites, carried on by various groups. The most successful of these has been a group in Kettering, England, which has been monitoring satellite telemetry and interpreting its meaning for several years. The Kettering group showed exactly how valuable an amateur tracking operation could be when it discovered the secret Russian Plesetsk launch site, something Western experts had only guessed at. What is more, the group accomplished this with only store-bought shortwave receivers.[4]

---

1 See Hynek, J.A. *Bulletin for Visual Observers of Satellites*, no. 8, May 1958. In: *Sky and Telescope*, V. 17, no. 3, Sept. 1975, pp. 160-163.

2 A history of the MOONWATCH program is given by J. Cornell, "The MOONWATCH Era Ends", *Sky and Telescope*, V. 50, no. 3, Sept. 1975, pp. 160-163.

3 Many Canadian astronomers participated in the MOONWATCH program. Details on the participation of the Winnipeg Centre of the Royal Astronomical Society of Canada, for example, are given in Hladiuk, D., "Project MOONWATCH", in: Belfield, P., ed. *A History of the Winnipeg Centre, RASC, 1911-1977*, Ch. 3, RASC, Winnipeg, 1977.

4 The Kettering group has received considerable attention recently. A summary of its activities and biographic reviews can be found in: Peebles, C. "Satellite Radio Tracking for the Amateur", *Spaceflight*, V. 25, Dec. 1983, pp. 459-60; and Solomon, S. "Eavesdropping on Soviet Satellites", *Science Digest*, V. 92, no. 1, Jan. 1984, pp. 32, 36, 81.

Chapter Two

Photographic Observations of Satellites

The Baker-Nunn camera was developed at about the same time as the MOONWATCH program. Its optics were designed by James G. Baker who was the inventor of the Super-Schmidt meteor camera. The mount and drive were developed by Joseph Nunn. Twelve such cameras were produced by the Perkin-Elmer Corporation of Connecticut and installed in locations around the globe. The first became operational in New Mexico, in November 1957, a full month after Sputnik 1 was launched. For that month, orbital data were available only through MOONWATCH stations. It is probably this fact that spurred the rapid development of satellite tracking technology in the following years.

Baker-Nunn systems are best suited for detecting high-altitude satellites, up to 40,000 km or more. Because of this, they complement radar tracking systems which are restricted to altitudes of less than 7,000 km. Baker-Nunn cameras are passive systems detecting the reflected light of satellites against the background of stars. Once a general set of coordinates is identified, a photograph is taken. The objects on the photograph are compared with a star chart using an overlay, and a satellite's position is noted. Successive photographs can determine the orbit of the satellite to within about 30 seconds of arc and in some cases to 2 or 3 seconds of arc. The position of the satellite is reported to the Space Defense Center so that the NORAD computer catalog can be updated.[5]

The major problem with the Baker-Nunn system is that the time required to develop the film may be as long as 90 minutes. That is certainly inadequate for rapid tracking and orbit determination since some satellites can change orbit in a shorter time. Ideally, information should be available in a time frame much closer to real-time to permit early warning of sudden orbit changes.

The limiting magnitude (i.e. the faintest apparent magnitude that may be observed) of the Baker-Nunn camera is also relevant to its capability for satellite tracking. This limiting magnitude is dependent on several variables, including zenith distance, the angular velocity of the photographed object, its visual magnitude and the sensitivity of the film emulsion. Another factor is the exposure time, which is inversely related to the magnitude. For an exposure at one second as a standard, the visual magnitude varies between $m = 12$ and $m = 14$, depending on the film used, which at many stations was Kodak Royal-X Pan.[6]

Most satellites have magnitudes averaging about $m = 14$, and they therefore fall within the range of the Baker-Nunn system. (The limiting magnitude for the human eye is about $m = 7.5$.)

5 Various studies of the Baker-Nunn system have been published. For example, see Solomon, L.H. "Some Results at Baker-Nunn Tracking Stations", *SAO Special Report*, no. 244, 1967.

6 A rather thorough description of optical and photographic tracking systems can be found in Veis, G. "Optical Tracking of Artificial Satellites", *Space Science Reviews*, V. 2, 1963, pp. 250-296.

Chapter Three

Photometric Observations of Satellites

Early in the history of satellite tracking, the problem of detection capabilities was realized and possible solutions were investigated. Russian scientists were among the first to explore alternatives to photographic tracking, as long ago as 1960.[7]

The only difference in the tracking hardware for photometric as opposed to photographic systems is the recording medium which consists of a photon counter coupled to a computer. Such devices are comparable to those used in astronomical research for investigations into distant objects such as quasars. Unlike photographic stations, however, photometric systems require more versatile tracking mechanisms because of the small area of the photocathode. This is important for tracking objects of magnitude less than m = 11.

Canada's involvement intensified when the Satellite Identification and Tracking Unit (SITU) was officially opened at the St. Margaret's Canadian Forces Station near Moncton, New Brunswick, on November 9, 1976. Its chief feature is an f/16, 61-cm Cassegrain telescope mounted on a modified Baker-Nunn triaxial support. This installation was intended to replace a Baker-Nunn photographic system at Cold Lake, Alberta, and followed an exhaustive ten years of testing at the USAF Avionics Laboratory on Wright-Patterson AFB. The light from an object is relayed through the telescope's optics to the photocathode which converts the incident photons to electrons. These electronic pulses are then recorded on paper or magnetic tape for further processing; they can also be sent to NORAD over telephone lines for analysis.[8]

With an increasing number of satellites in orbit, the necessity of an additional tracking unit such as the St. Margaret's station was obvious. The St. Margaret's station was also heralded for its "semi-automatic" features. In addition to the photometric system at St. Margaret's, there is a Baker-Nunn camera on loan from the SAO site at Alisfantsfontaine, South Africa. The camera can hold 1,000 linear feet of film which can be processed at SITU at a rate of 5½ feet per minute. The photographic system is described as being able to detect a "basketball at a distance of about 20,000 miles".[9]

The interpretation of photometric measurements of satellites has provided a wealth of data to scientists. This has come about through revelations concerning the density of the Earth's atmosphere and its actual composition. But scientific information about the satellites themselves is also easily discerned from the data. It is possible to determine the rate of rotation of a satellite, its shape, size, and the reflective properties of its surface. Fluctuations in brightness were first noted by observers of booster rockets, making it simple to speculate upon their altitude and lifetime.

There have been a large number of studies of orbiting satellites based on various observations, resulting in detailed calculations of their orbits. For example, between May 1971 and June 1972, over 1,500 optical and radar observations were compiled for Cosmos 387. Included were observations from Hewitt cameras (a variation of the Baker-Nunn system), kinetheodolites, MOONWATCH stations and radar installations. Only through the combination of all these observations was it

---

7 The great Russian astronomer, I.S. Shklovskii, described photometric tracking in "Optical Methods for the Observation of Artificial Earth Satellites", *Artificial Earth Satellites*, V. 1, 1960, pp. 55-63.

8 Kissell, K.E. and Mavko, G.E., *The Canadian Forces/ NORAD Satellite Identification Sensor at St. Margaret's*, USAF Avionics Lab., Wright-Patterson AFB, Ohio, AFAL TR-77-189.

9 Wooding, B. and Spruston, T.A. "The Canadian Armed Forces and the Space Mission", *Canadian Defence Quarterly*, V. 5, no. 2, Winter, 1975, pp. 15-20.

Chapter Four

Ground-Based Electro-Optical Deep Space Surveillance (GEODSS)

possible to obtain an extremely accurate plot of the orbit. (Cosmos 387 was launched from Plesetsk as an unannounced payload; its visual magnitude of m = 6 makes it a relatively easy object to track.)[10]

Optical tracking stations have enabled the compilation of lists of satellites and their magnitudes. In turn, extrapolation and analyses of these lists have been used to identify the shapes and sizes of satellites under observation; this has permitted the determination of detailed information on secret and otherwise unannounced payloads. For example, observation of the "flash rate" gives information on the tumbling of rocket bodies, which has allowed the histories of many satellites and/or their rockets to be accurately traced. Such data are the guide by which successes and failures of satellite missions, whether announced or unannounced, can be determined. Accuracies in orbital determination using visual observations tend to be in the range of only a few metres.

One widely-published photograph clearly showed the "hammerhead" appearance of Sputnik 2, although it was taken with a 24-inch tracking telescope with a 500-inch focal length that managed to capture the satellite at a range of 200 miles.[11] The photograph was taken in 1957 with a purely optical system. Satellite measurements and imaging systems in the 1980's are much more sophisticated.

During the 1960's, it became apparent to individuals involved in satellite tracking that there were inherent problems with conventional tracking systems. Radar was either of insufficient resolution or of too short a range to satisfy upcoming program requirements for the greatly detailed surveillance of satellites. Similarly, optical systems had insufficient accuracy, sensitivity and speed. A major problem with optical systems was their inability to cope and function in real-time. But in the 1970's, with developing silicon diode technology and the dawn of the age of micro-processors, several laboratories were assigned the task of designing a *real-time* photoelectric system for satellite tracking. A design was accepted in 1974, and in September 1975, an experimental test site was put into operation at the White Sands Missile Range near Socorro, New Mexico. It was the first station in the GEODSS program developed by the USAF Systems Command. In 1979, the cost of installing a network of five sites was set at $62 million. The second and third sites are at Taegu, South Korea, and on Mount Haleakala, on Maui, Hawaii. A fourth site is presently being installed on the island of Diego Garcia in the Indian Ocean. Construction on a fifth site is expected to begin by 1985 "somewhere along zero degrees longitude in the eastern Atlantic", possibly in Portugal or on Ascension Island. (Original plans for the fourth and fifth GEODSS sites had called for installation in Iran and Morocco.)[12] The GEODSS system was given five major missions: 1) initial detection, 2) tracking, 3) catalog maintenance, 4) collection of

10 Many studies of individual satellites have been published in the journal *Planetary and Space Science*. In particular, King-Hele and Pilkington have performed detailed analyses of optical tracking. See King-Hele, D.G., "Analysis of the Orbit of Cosmos 387 (1970-111A). Near 15th-order Resonance", *Planetary and Space Science*, V. 22, pp. 509-524; and Pilkington, J.A. "The Visual Appearance of Artificial Satellites", *Planetary and Space Science*, V. 14, 1966, pp. 1281-1289.

11 Published by Stine, G.H. "How the Soviets Did It In Space", *Analog*, V. 81, no. 6, Aug. 1968, pp. 48-71.

12 Details on the operation and development of the GEODSS system have been presented in a large number of publications. A good, readable summary is given by Beatty, J.K. "The GEODSS Difference", *Sky and Telescope*, V. 63, no. 5, pp. 469-473. Another important source is: Smith, B.A. "Ground-Based Electro-Optical Deep Space Surveillance System Passes Reviews", *Aviation Week and Space Technology*, 27 Aug. 1979, pp. 48-53. A considerable number of documents have been released by MIT's Lexington Lincoln Laboratory, Electronic Systems Division, at Hanscom AFB. A good review at a semi-technical level is given by Weber, R. "Passive Ground-Based Electro-Optical Detection of Artificial Earth Satellites", *Optical Engineering*, V. 18, no. 1, 1979, pp. 82-91. Specific MIT technical reports relevant to GEODSS, used as references to the following discussion, are: ESD TR-77-125; 78-33; 78-270; 79-277; 79-326; and 79-350.

brightness data, and 5) other classified tasks. The first site has a main telescope with a 31-inch mirror which is a f/5 unit with a one-degree field on a 80-mm plate. The auxiliary telescope is a 14-inch, f/1.7 Schmidt with a seven-degree field.

The operation of the system begins after dusk with calibration on a star near the probable search area using data on file. After corrections are made, if necessary, data are obtained on night-sky brightness and the atmospheric extinction coefficient (necessary for accurate brightness measurements). This procedure takes about fifteen minutes, after which a specific satellite is called up from the computer file. Slewing is done rapidly, so that the target should be in position in about one second. If the desired satellite is detected immediately, its position is recorded and the catalog is updated. If desired, the satellite can be automatically tracked and its movement recorded, either from its video output alone or using a GaAs photomultiplier.

If the satellite is not detected, search programs are initiated and continued until it is found. The programs are stored in the hardware at the site, namely a MODCOMP IV-25 which has 256 kilobytes of core memory and 25 megabytes on disk. Two major files can be easily accessed: one is a 400-element satellite catalog and the other, the SAO star catalog, has over 250,000 entries. The catalogs and the hardware are continuously updated and modified.

The system uses two types of Moving Target Indicator (MTI) hardware: one semi- and one fully automatic (MTI and AMTI). In the MTI, a video disk recorder records and plays back the incoming signal with a delay of 1 to 4 seconds so that moving satellites are readily apparent. With AMTI, a software program called ASTRO-SO automatically compares successive frames and determines "threats" which are identified by their movement against the background.

The type of detector used for the GEODSS system is an Ebsicon, which is a generic name for any camera tube containing a silicon diode target that produces an electronic signal under photon bombardment. Coupled to the Ebsicon for increased sensitivity is a single-stage image-converter tube that typically increases the detection capability by a significant factor.

The signature of a satellite, used by Space Object Identification (SOI) systems, is obtained from its pattern of varying brightness as it rotates and moves around the Earth. These signatures are stored and can be called up for comparison when needed. A change in signature is an alert to its reorientation and/or reactivation. The use of this information will be explored in a later section.

Sites other than that at White Sands have a slightly larger series of optics, each with two 1-metre main telescopes having 2.2-metre focal lengths and 2.1-degree fields. As well, each site has a third auxiliary 0.4-metre telescope with a 6-degree field. Each telescope has an 80-mm Ebsicon tube with a 32-mm target. These main telescopes have a normal limiting magnitude of $m = 16$, although they can be "pushed" to $m = 18.5$. The auxiliary systems have a limit of only $m = 14.5$ but, because of their wider field and more rapid slewing capability, they are used selectively for observations of low-altitude reconnaissance satellites.

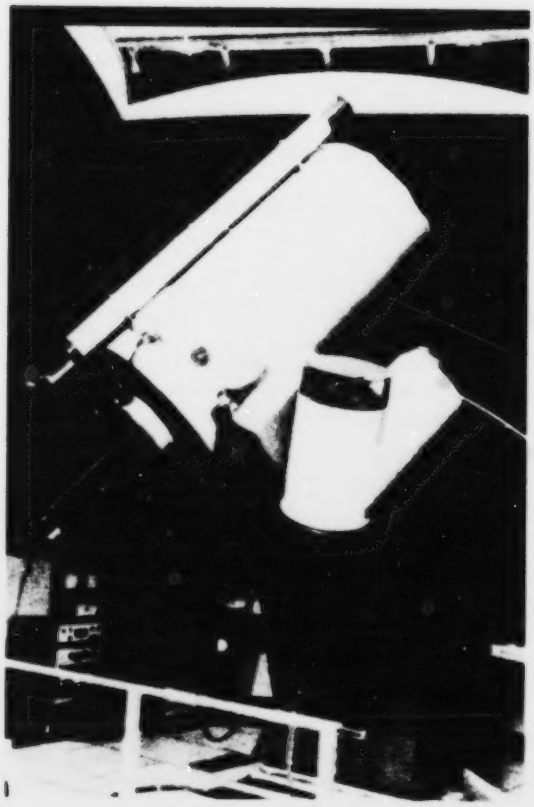
In addition, each site has a video zoom feature which can centre on a particular section of the screen output for operator assistance. Of particular interest is the inclusion of a radiometer to monitor infrared emission from satellites. This enables satellites to be differentiated from one another and classified as payloads, boosters or fragments.[13]

[13] McNamara, F.L. and Krag, W.E. "Radiometers for Measurements of Space Objects", MIT Electronic Systems Division, TR-79-9.

Although it is the movement of the satellites that gives them away (for example, a geosynchronous satellite moves 15 seconds of arc per second), apparently stationary satellites with a sidereal rate of revolution can be identified through comparison with star catalogs, albeit with some difficulty.

Locations of tracking sites used or noted by GEODSS are given in Appendix 1.

Recently the GEODSS sites have been further upgraded to use Digital Equipment Corporation PDP II-70 computers. ASTROSO has been refined, and the Resident Space Object Catalog (RSOC), maintained by NORAD, has been expanded to over 1,000 entries. Satellites can be identified within six seconds (complete analysis takes a full minute) and their position can be determined to within 10 seconds of arc.[14]



▲ The main telescope of the GEODSS Experimental Test Site at White Sands AFB. It has an aperture of 31 inches and is a P/5 system (from Weber, 1979).

[14] Randolph, A. "USAF Upgrades Deep Space Technology", *Aviation Week and Space Technology*, 28 Feb. 1982, pp. 57-8.

Chapter Five

Resolution of Space Objects

Regardless of the cost and number of years under development, optical satellite systems must abide by the laws of physics. There are limits to the resolving power of optics which are derived from calculations involving the camera apertures and the observed objects themselves.

The limiting magnitude for any telescope is defined as:

$$m = 2.7 + 5 \log D$$

where D is the diameter of the aperture in millimetres. Thus, the limit for a GEODSS system with a mirror of 1-metre diameter will be m = 17.7, sufficient to resolve most satellites.[15]

Another factor for consideration is the smallest resolvable angle, which is defined as:

$$\phi = 120/D$$

where ϕ is given in seconds of arc. For the same GEODSS system, therefore, this angle will theoretically be about 0.12 seconds of arc. However, ϕ is limited also by the Earth's atmosphere which sets this ground-based limit at about 0.5 seconds of arc.

As an example, let us consider the case of Molniya 1, Flight 20, which is a communications satellite launched from Plesetsk on April 4, 1972. Its perigee is at a height of 480 km, and it has an apogee of nearly 40,000 km. The satellite is a cylinder 3.5 by 1.7 metres, with several "paddle wheel" solar arrays and two dish antennas. Let us assume it presents a 3-metre face towards a GEODSS station. We can calculate its angular diameter by using the relation:

$$d/h = \tan \phi$$

where d is the diameter of the satellite, h is its altitude and ϕ is its angular diameter, in degrees. When d is 3 m and h is 1,000 km, ϕ is 0.00017 degrees or 0.6 seconds of arc. This is within the capability of the GEODSS system defined in the example.

As a further example, let us use a reverse situation. Consider the "Big Bird" reconnaissance satellite of the United States. It is reportedly capable of a ground resolution (from orbit) of 150 mm. At the smallest resolvable angle, therefore, where ϕ is 0.5 seconds of arc, the altitude can be calculated to be a *maximum* of 61 km. This is obviously too low, since the maximum altitude of the Big Bird satellite is known to be about 150 km, and its perihelion cannot be 61 km as that would place it within a dense region of atmosphere. However, even for an altitude of 100 km, the resolution will be near 0.25 metres, still a respectable value (of the order of 10 inches).[16]

[15] The limits discussed in this section are approximate values only and dependent on many variables. In general, the smallest resolvable angle is merely the wavelength divided by the aperture. Basic sources for these data include various astronomical publications, for example the *Observer's Handbook* of the Royal Astronomical Society of Canada (1983). Other sources are: Lambeck, K. "Probability of Recording Satellite Images Optically", *SAO Special Report*, no. 230, 1966; McCue, G.A., Williams, J.G. and Morford, J.M. "Optical Characteristics of Artificial Satellites", *Planetary and Space Science*, V. 19, 1971, pp. 851-868; and Veis, G. "Optical Tracking of Artificial Satellites", *Space Science Reviews*, V. 2, 1963, pp. 250-296. Curiously, one of the more useful sources on detection and resolution is Ayer, F. "Instrumentation for Unidentified Flying Object Searches", *in*: Gillmor, D.S., ed. *Final Report on the Scientific Study of Unidentified Flying Objects*, Bantam Books, N.Y., N.Y., 1969, pp. 761-804.

[16] Information on USAF photoreconnaissance satellites and their Russian counterparts comes from: Bamford, J. *The Puzzle Palace*, Penguin, N.Y., N.Y., 1983; Brown, N. "Military Uses of Satellites", *in*: Fishlock, D., ed. *A Guide to Earth Satellites*, Elsevier, N.Y., N.Y., 1971, pp. 121-133; Canan, J. *War in Space*, Berkley Books, N.Y., N.Y., 1984; Clark, P.S. "Soviet Photoreconnaissance Satellites", *Spaceflight*, V. 25, no. 6; Karas, T. *The New High Ground*, Simon & Schuster, N.Y., N.Y., 1983; and Smolder, P.L. *Soviets in Space*, Butterworth Press, Guildford & Landon, 1973. In addition, the yearbooks of TRW Space Systems in California have provided ample data for consideration.

For a photographic system, the resolution is also dependent on the emulsion. Under perfect conditions, an image of a satellite is a disk of diameter d, where

$$d = (2\lambda f)/D$$

For this calculation λ is the wavelength, f the focal length and D the diameter of the aperture of the camera. Thus, for a Baker-Nunn camera with a focal length of 500 mm and an aperture of 50 cm, the diameter of a point source will ideally be about 3 microns. However, because of the effect of the atmospheric visibility conditions, this diameter is increased by a factor of 10 so that d usually is about 20 to 40 microns for fast emulsions. Recent advances in remote sensing technology have reduced these values somewhat, so that good resolution of less than 10 microns, and often near 2 to 3 microns, can now be obtained. A Baker-Nunn camera can photograph stars of

$$m = 14.5$$ with a 20-second exposure.

The field of a typical Baker-Nunn camera is about 30 by 5 degrees. The scale on the film is about 2.5 microns per second of arc. Therefore, the camera will theoretically be capable of photographing an object of

$$d = (2\lambda)/s$$

seconds of arc in diameter, where s is the scale. The minimum resolvable angle is therefore about 0.5 seconds of arc.

The resolution of radar tracking systems should also be considered. Although radar tracking systems, in contrast to photographic methods, are active rather than passive systems and although they utilize a different part of the electromagnetic spectrum, the basic principles are similar to those for photographic methods. For radar, resolution is defined by the relation:

$$r = 70(\lambda/D)$$

where r is the resolving power (the minimum separation in degrees of arc required to distinguish between two objects) and D is the antenna diameter. For a radar unit with an antenna diameter of 3 m and a typical wavelength of 3 cm, the beam width is 0.7 degrees of arc. For example, the maximum distance for a 3-m antenna would be about 250 m. Therefore, two objects side by side at distances greater than 250 m will appear to be one.

The resolution of a space object is dependent on several variables: 1) the wavelength used, 2) the optics, 3) the altitude of the object, 4) its size and shape, 5) its brightness, and 6) its angular velocity. It is obvious that, for example, a wavelength of 570 nanometres is not suitable for day-time or cloudy-day observations. The resolving capability of an optical system is dependent on its focal length and aperture, the system ideally having a focal length larger than the aperture width. It is also obvious that an object in a high geostationary orbit will be less easily tracked than one in a low reconnaissance orbit. The size of the object is directly related to its brightness, which is dependent upon its albedo as well as its phase angle. The phase angle will be dependent on its angular velocity, dependent in turn on its altitude. The problem of satellite observations is thus reduced to only two aspects: the observation system and the orbit (inherently, the *purpose*) of the satellite. Present optical and electro-optical systems are able to observe all types of satellites and contribute in real-time to the NORAD SPACE-TRACK satellite catalog. Giant Phased-Array Radars like the 13-storey-high structure at Elgin AFB in Florida are limited in their resolution of high-orbiting satellites, but capable of tracking a wealth of lower satellites with advanced data processors. Photometric and photographic systems, consequently, are vital for their abilities to complement radar observations. And, with an increasing number of payloads in orbit each year, the overloading of any one system must be avoided at all costs, for both military and navigational reasons.[17]

17 See Wooding, B. and Spruson, T.A. *op. cit.*, note 9.

Chapter Six

Space-Based Weapons

On June 18, 1982, at the second United Nations Special Session on Disarmament (UNSSOD II) Prime Minister Trudeau called upon the world community to negotiate a treaty to prohibit the development, testing and deployment of all weapons for use in outer space. While it is generally assumed that there are at present no weapons based in space, there is and has been a considerable amount of research and development in the area of space-based weapons. This interest in the feasibility of the "weaponization" of space, as distinct from the militarization of space or the military use of space, has a reasonably long history. For example, when the Soviet Union's COSMOS 139 was launched on January 25, 1967, it was believed to be the first flight test of a Fractional Orbital Bombardment System (FOBS).

In theory a FOBS weapon would be launched into a low orbit, travelling over the horizon towards US bomber bases. When in range, it would fire its retro-rockets and would drop towards its target with a 1- to 3-megaton payload. While in orbit, the FOBS would resemble an ordinary payload, requiring perhaps an hour to arrive in range of its target. Once out of orbit, the FOBS would give only 3 minutes' warning, much less than the 30 minutes for ICBMs. Although the USAF has over-the-horizon radars which bounce high-frequency radio waves off the ionosphere and can thus detect FOBS in orbit, those radars can be affected by sunspot activity and are highly susceptible to jamming. Optical systems are much better suited for FOBS observations. (A probable scenario for FOBS weapons would be multiple launchings to take out many targets. Although a single FOBS would be difficult to identify, it would be strategically improbable that only one would be used, with the result that there might be even more warning time than for ICBMs.)[18]

Although the FOBS has been operational for many years, a different kind of space weapon, the Directed Energy Weapon (DEW), has been described more often in the press. The most heavily researched area of DEW development is that of the laser, and even it has received comparatively little funding: less than $2 billion has been spent by the Pentagon since the 1970's on high-energy laser weapons. However, the allocation for laser weapon research has been constantly rising.[19] The Soviet Union, too, has been pursuing DEW development. In fact one source has suggested that its laser weapons development programs are four or five times larger than those of the US, and that it presently has an operational low-altitude anti-satellite laser stationed at Sharyshgan.[20]

The potential for laser weapons is indeed enormous. A photon takes only six-millionths of a second to travel one mile, so that an ICBM travelling at Mach 6 at a range of 1600 km would travel only 3 metres during the flight of a laser beam towards it. But the situation is not quite so simple; a laser weapon (*at the present time)* cannot simply be pointed at incoming ICBMs and vaporize its targets. A certain length of time is required for the beam to burn through the outer shell of the target vehicle. Once through the shell, the beam must strike a vital component such as a guidance circuit in order to be effective. Also, during its passage through the atmosphere, a laser beam will diverge slightly and be dispersed by the atmosphere, so that the required "dwell time" on the target will be longer. Finally, the aiming and the disengaging mechanism must be extremely accurate in order to point the laser, distinguish targets, recognize when a target is disabled and move on to other targets.

Lasers can be defended against, at least to some degree. Cruise missiles, for example, are poor targets because of their erratic flight. The vital components of ICBMs can be shielded with highly reflective material, again increasing the required dwell time. Nevertheless, there is no question that the ideal medium for laser weapons is space because the atmospheric dis-

18 Brownlow, C. "Soviets Prepare Space Weapon for 1968", *Aviation Week and Space Technology*, 13 Nov. 1967, pp. 30-31.

19 Primary source: Payne, K.B., ed., *Laser Weapons in Space*, Westview Press, Boulder, Colorado, 1983. Also: Canan, J. *op.cit.*, note 16.

20 Main, Roger P. "The USSR and Laser Weaponry: A View from Outside", *Defence Systems Review*, V. 3, no. 3, 1985, pp. 67-80.

tortions of a beam in transit are removed. Lasers on a space-based platform could, therefore, be used to intercept ICBMs in flight.

The United States is currently developing DEW research through the Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) and its Space Defense Technology programs. Three main projects now underway are Talon Gold, ALPHA and LODE, all interrelated in the development of a space-based laser. In addition, the USAF has coupled a Hughes pointer-tracker with a laser aboard an Airborne Laser Laboratory (ALL). The ALL is very large and exceptionally manoeuverable, filling essentially the entire cargo bay of the plane. Both the Navy and the Army have laser programs as well, although their development has not achieved the "height" of the Air Force program.

The first practical laser came to light in 1960, when two American scientists developed the ruby laser which generated only one watt of power. The gas-dynamic laser was produced in 1967, giving 100 watts. Then, only a year later, a carbon dioxide laser was developed with an output of 60,000 watts. About this time, DARPA formed the High Energy Laser Research Group (HELRG) to study the use of lasers for weapons. Soon, the electric-discharge laser was developed, followed in the mid-1970's by the chemical laser capable of producing several megawatts.

A laser weapon was first successfully demonstrated in 1973 at the HELRG facilities at Kirtland AFB, New Mexico. A gas-dynamic laser, using a telescope to sight and point, shot down a drone aircraft, albeit a slow-moving one. Then, in 1978, a deuterium/fluoride laser shot down three TOW antitank missiles travelling at 500 mph. However, this required eight tries and a huge generating station to produce the needed 300-watt output. Nevertheless, the move to space seems only a short step away.

Particle beam DEWs, on the other hand, are not quite so far along in development. Their main advantage is that a beam need not "cut" through a missile, but only play upon its guidance circuits to be effective (although in actual operation, a beam would certainly raise the temperature of the missile).

As was true of lasers, there exist defences against particle beams, as well as problems in their operation. Any beam of particles (electrons, protons, neutrons, etc.) will tend to diverge because of the charges on the individual components, although neutron beams would be less susceptible to this. Furthermore, distortions in the geomagnetic field would wreak havoc with a beam, kinking and warping its path. In space, an Anti-ballistic Missile (ABM) DEW would need a radar-pointing system, which could be jammed or confused by chaff or decoys. Also possible is the detonation of a nuclear weapon in the atmosphere to disrupt a beam's propagation channels. It seems that, as with most weapons, an improvement in offence merely initiates an improvement in defence.

Despite these drawbacks, DARPA is currently operating the Particle Beam Technology Program, which has a directive to produce the required technology by 1987. One of its tasks is the "generation of low-divergence neutral beams for space applications". Clearly, this is the ASAT DEW system.[21] The USSR also seems to be engaged in research into particle beams for space weapons.[22]

21 Much has been written about the development of particle beam weapons. A very readable article is that by Parmentola, J. and Tsipis, K., "Particle Beam Weapons", *Scientific American*, V. 290, no. 4, 1979, pp. 54-65. It is excellent in its description of the technology and provides useful information on the weapon's weaknesses and vulnerabilities. The authors de-emphasize, however, the intense research devoted to the DEW development at the present time. While it is probably advisable to be cautious in discussions on DEW development, one must also recognize the advances of the past decade. Clearly, DEW weapons are edging closer to reality.

22 Main, R. *op cit.*, note 20.

Both the United States and Soviet Union have reusable space vehicles. The American Space Shuttle program is a major success despite its development problems. The Soviet Albatros (or Raketoplan) has also met with some success, although it is not widely publicized. Both vehicles can transport payloads into orbit and can intercept satellites for inspection. This last point is very important in terms of military value.[23]

Because of the delicate and fragile nature of a satellite payload, any deviation from 100% efficiency can be severely disrupting. Consequently, ASAT systems need not be very sophisticated: the simple collision with an "unarmed" ASAT missile would probably be sufficient.

Soviet ASAT technology is well ahead of any similar American effort. In 1976, the Soviets began a series of "killer satellite" tests employing target-seeking "oversized grenades" that could intercept a target in space. And, in 1981, the highly classified TEAL BLUE and TEAL AMBER tracking cameras (of the GEODSS advanced system) reportedly photographed ASAT launching tubes on Cosmos 1267 that docked with Salyut 6. This gave rise to the report that the Soviets were preparing to run an orbiting, anti-satellite "battle-station".[24]

The United States has been developing an ASAT capability in response to the Soviet system, but using a different technology. On January 21, 1984, an F-15 over the USAF Western Test Range launched an unarmed, two-stage Short-Range Attack Missile (SRAM) into space to test its guidance system.[25]

In all likelihood, despite these developments, the age of the space battle-station (the "Deathstar") is not *quite* upon us. Nevertheless, large ASAT bases are probably in the planning stages in both the US and the USSR. It is known, for example, that the Soviets are moving towards a permanent space station. It would be supported by the Progress unmanned "supply tug", reached with the new Soyuz-T manned vehicle, and may be an adaptation of the Cosmos 1267 "space station module".[26] It has been claimed that the "module" is nothing but a "cover-up" for a huge ASAT station. Telemetry from Cosmos 1267 is reported by the amateur Kettering group to be of a kind unmatched for other Cosmos flights.

Finally, there is the curious report that the Soviets have developed an immense particle-beam installation for defending against American ICBMs. According to USAF intelligence sources, a secret base has been built at Semipalatinsk in Kazakhstan. Deep underground is a large steel sphere connected to a magneto-hydrodynamic generator. Supposedly, a small nuclear device could be detonated in the sphere and the energy transferred through the generator into an accelerator where a proton beam would be produced. The physics of the system is not impossible, only beyond present capabilities. But the strategy in employing such a system appears skewed, since it is vulnerable to many countermeasures. Furthermore, a beam weapon with a "nuclear bomb" power source produces an unnecessarily strong proton stream according to critics (though perhaps the critics are overlooking the fact that a very powerful beam would carry several advantages over one produced more conventionally).[27] As mentioned earlier, although the placement of such a system on board a satellite is possible in theory, the satellite itself would be extremely vulnerable to ASAT weapons.

---

23 For details on the Soviet shuttle, see Covault, C. "Soviets Orbit Shuttle Vehicle", *Aviation Week and Space Technology*, 14 June, 1982, pp. 18-19. Also see Humble, R.A. "The Soviet Space Shuttle and Related Military Developments", *Canadian Defence Quarterly*, V. 12, no. 3, 1982/83, pp. 30-33.

24 Powell, J.W. "Photography of Orbiting Satellites", *Spaceflight*, V. 25, no. 2, 1983, pp. 82-83.

25 The ASAT test was noted in *Aviation Week and Space Technology*, 30 Jan., 1984, p. 19.

26 A good view on Soviet space development is that of Oberg, J. "Soviet Developments Point for Space Operations Center", *Astronautics and Aeronautics*, May 1982, pp. 74-77.

27 Douglas, J.H. and Thomsen, D.E. "The Great Russian 'Death-Beam' Flap", *Science News*, V. 111, 21 May, 1977, pp. 329-335.

Chapter Seven

Verification of Space Systems

There are several international agreements presently in force which directly and explicitly relate to the military use of space.[28] The first major agreement was signed in 1963. Usually called the *Partial Test Ban Treaty*, it prohibits the explosion of a nuclear device (*inter alia*) in outer space (Article I). There are currently about 111 parties to this treaty.

The placement of "nuclear weapons or other weapons of mass destruction" in Earth orbit is banned by the *Outer Space Treaty* of 1967. This important agreement also forbids "the establishment of military bases, installations and fortifications, the testing of any type of weapons and the conduct of military manoeuvers on celestial bodies." The *Outer Space Treaty* presently has about 92 parties.

The 1977 *Environmental Modification Convention* prohibits the hostile changing of natural processes, including those of outer space, which would result in widespread, long-lasting or severe effects (Articles I and II). About 54 states are presently parties to this agreement.

The above treaties are all multilateral agreements. One bilateral treaty between the US and the USSR also has direct relevance to outer space: the *Anti-ballistic Missile Treaty* of 1972. Under this agreement each party "undertakes not to develop, test or deploy ABM systems or components which are sea-based, air-based, *space-based*, or mobile land-based" (Article I, emphasis added).

Of course, although various treaties may be legally in effect, determining compliance with them is another matter. For example, the *Outer Space Treaty* is difficult to verify at the present time. It is possible that an unannounced, and hence unknown, nuclear weapon is in orbit at this very moment.

However, the use of GEODSS and other satellite inspection systems is slowly changing that situation. With ground-based optical systems, one can observe satellites in orbit and resolve details about them. As well, radiometers at GEODSS sites can detect radiative emission and/or leakage from orbiting satellites, checking power generation and their state of operation.[29]

Improved versions of GEODSS systems such as the TEAL AMBER sensor will be not only faster, but also more sensitive to faint objects in space. And new systems are continually being developed each year.

Ground-based observations have extended far beyond advanced astronomical systems. In the Middle East, a DARPA radar system is reportedly capable of actually forming images of low-altitude satellites.[30] The same is said of the MIT "Haystack" radar in Lexington, Massachusetts. At the Maui Optical Tracking and Identification Facility (MOTIF) in Hawaii, a lidar system (using light instead of radio waves) utilizes a "compensated imaging telescope" to maximize information received by analysis of its passive and active sensors.

Space-based reconnaissance systems are also used to observe satellites. Space-based systems first appeared in the 1960's for ground observation missions. When Eisenhower described the proposed "Open Skies" program, which was allegedly intended to provide verification without disarmament, the Soviets "curtly" turned it down. That was in 1955 at the Geneva Summit conference, only a year before U-2 spy planes began flying over Russia. Then, in 1960, with the U-2's out of action, Discoverer 13, the first "spy satellite", returned photographs of Earth.[31]

---

28 An excellent overview of arms in space and their relevance in arms control agreements is given by Lindsey, G.R. "The Military Uses of Outer Space and Arms Control", *Canadian Defence Quarterly*, V. 13, no. 1, 1983, pp. 9-14. For a detailed review of outer space law relevant to arms control see the Canadian working paper presented to the Conference on Disarmament entitled "Survey of International Law Relevant to Arms Control and Outer Space", CD/618, 23 July 1985.

29 McNamara, F.L. and Krag, W.E., *op. cit.*, note 13.

30 Karas, T. *op. cit.*, note 16.

31 Steinberg, G.M. *Satellite Reconnaissance*, Praeger Publishers, N.Y., N.Y., 1983.

Since Discoverer, reconnaissance satellites have advanced enormously. In 1971, the first Big Bird satellite was launched. In its polar orbit, it sent television pictures back to Earth as well as film capsules. Big Bird flies at a perihelion of about 150 km, still higher than some smaller, "close-look" satellites sent up on speciality missions to examine a particular area of the globe.[32]

Of more strategic importance than the Big Bird series of satellites is a highly secret series called the KH-11. The first of these was launched in 1978, and has a higher perihelion (about 250 km), and hence a longer lifetime, than the Big Birds. KH-11's have GEODSS-type electro-optical sensors on board, for the extreme resolution of ground stations. It is believed that KH-11's also probably have sophisticated infrared sensors for "observing" underground missile bases. Big Birds can release data packages to be picked up in nets trailed by aircraft. KH-11's, on the other hand, transmit their data to ground stations such as those at Thule or Guam, or else to higher-orbiting Defense Support Program (DSP) satellites for processing and later transmission.[33]

In addition, there exist Rhyolite VHF ELINT satellites for monitoring communications, and Vela Hotel satellites for monitoring radioactive emissions.

Satellite-to-satellite viewing may already have been employed. When the first space shuttle lost some tiles during its launch, not only were GEODSS sites used to examine its heat shield in detail, but Big Birds and/or KH-11's examined it from orbit as well.[34] It is reasonable to assume, therefore, that observations of other satellites could be made routinely by systems such as the KH-11's.

The idea of using satellites to verify satellite activities is not new. For example, the United States created Satellite Inspection (SAINT) interceptors as early as 1960. The purpose of the SAINT program was twofold: 1) satellite inspection of other satellites by satellites at close range, and 2) actual interception of satellites by satellites. This first practical ASAT system was phased out for various reasons, one of which was the possibility of "enemy" satellites being "booby-trapped" to prevent close inspection. Also, inspection by one side would certainly encourage inspection by the other, and this might not be desirable.

(With regard to "booby-trapped" satellites, consideration might be given to Salyut 6, which apparently possesses ASAT "missile tubes". The one-metre tubes were unusually small for an offensive ASAT system, but were regarded as experimental. However, the subject of "space mines" has been mentioned in ASAT literature, and the possibility that the tubes are mine launchers for *defensive* action must be acknowledged.)[35]

Since existing satellite reconnaissance systems are designed to inspect sensitive areas both on the ground and in space, and because they are in generally low orbits, they are prime targets for ASAT devices. One only has to remember the U-2 incident to realize the precarious situation of reconnaissance missions. With the development of ASAT weapons, a space-based repeat of that incident is possible. In fact, it may have already occurred: it was suspected that a ground-based Soviet laser was responsible for the "blinding" of an American reconnaissance satellite, although later reports "identified" the cause as gas fires in the Persian Gulf.[36]

In the future, since ground-based radar is limited to low-orbiting satellites and GEODSS is limited to night-time, clear-sky viewing, an entirely new system may be required. This system may consist of inter-orbital optical systems, based in space, and ground-based lidars.

---

32 Karas, T. *op. cit.*, note 16.

33 *Ibid.*

34 Hoagland, R.C. "Superspy in Orbit", *Science Digest*, V. 89, no. 6, July 1981, p. 32.

35 Oberg, J. "Soviet Developments Point for Space Operations Center", *Astronautics and Aeronautics*, May 1982, pp. 74-77.

36 Main, R. *op. cit.*, note 20.

Chapter Eight

Summary

Arms races and military competition can lead to highly destabilizing and dangerous situations. Strategic stability can, however, be improved by the introduction of arms control treaties with effective verification procedures. It is towards this goal that any reasonable proposals must lead.

Astronomical techniques show promise for their use in verification strategies for space-based weapons systems. Since the launching of the first satellites in the late 1950's, their observation and tracking have been a high priority for military defence. These tasks were first performed under the auspices of the civilian MOONWATCH program, then hurriedly updated to Baker-Nunn photographic camera sites. As soon as these were in operation, it was obvious that they were still unsatisfactory because of their non-real-time nature.

Photometric observations were the next to be tested, with the technology borrowed directly from astronomy. Eventually, on-line electro-optical systems were developed that improved both resolution and the capability of real-time requirements. Throughout the development of sensors for tracking purposes, the instruments and technology used have been primarily astronomical in nature. A point has been reached now, however, where military astronomy technology has surpassed civilian astronomy technology. GEODSS sites, in fact, have been petitioned by astronomers to install "black boxes" to store stellar data for later transfer to laser disks and distribution to astronomical institutions. Asteroid surveys have also been performed with GEODSS equipment with some success.

Optical satellite surveillance is an extremely crucial element of the NORAD SPACETRACK system. In addition to the civilian telecommunications' need to maintain an accurate record of satellites, there is a very real need for military tracking. Since radar is accurate only to about 5,000 kilometres in altitude, optical systems are needed for high-orbit satellites. GEODSS thus fills a gap in surveillance systems. The TEAL AMBER sensor and its future generations will improve resolution greatly over the next decade, and the use of active systems, such as lidar satellite tracking, may supplement observations to a larger extent.

Satellite tracking is becoming more important at the present time as the implications of ASAT systems become better understood. Observations of satellite manoeuvers can lead to information on the operation of military missions in space. These observations can be used by verification groups to assess the extent to which space is becoming militarized.

The concept of the verification of space systems is worthy of pursuit, but another set of procedures must be developed for ground-based sensors. From a purely astronomical standpoint, the suggestion that GEODSS sites turn over stellar data is an interesting one. But a satellite verification group could make use of tracking data as well. An independent group could analyze the tracking data for unusual or unwarranted space activity. This is providing, of course, that the information is releasable. If not, since the technology is available, then independent GEODSS sensors could be built.

The Baker-Nunn camera at Cold Lake, Alberta, which was removed from service because of its non-real-time capability, was given to the University of Calgary for astronomical use. If other existing Baker-Nunn systems were replaced by electro-optical systems with a near-real-time capability Baker-Nunn cameras might then be made available to astronomical institutions and/or reserved for possible future use by verification groups.

Not to be excluded from consideration is a possible catalog of satellite-to-satellite observations. If a verification group was granted even partial access to such a catalog for the purposes of the verification of satellite intent and inspection, the arms control features would be valuable indeed. If these data were to be made available bilaterally, then the effect would be inherently stabilizing.

Many arms control verification proposals involving satellite reconnaissance and other types of space systems have been made during the course of arms talks. These have ranged from the use of satellite reconnaissance to detect the construction of missile bases to the actual on-site inspection of launch platforms. This shows exactly how valuable space systems are for the prospects of arms control.

Chapter Nine

Canada and Ground-Based Systems for Space Verification

At this moment, there is one electro-optical satellite tracking station in Canada, namely the St. Margaret's site in New Brunswick. Although not a true GEODSS site, it has many of the GEODSS functions, and its data are used to update the NORAD satellite catalog. While there are several GEODSS stations around the world, the ability of some satellites to change orbits rapidly for offensive manoeuvers might suggest that additional stations could be welcomed to provide accurate, real-time tracking. At least one additional GEODSS or GEODSS-clone station might be installed in Canada. The location would be dependent on the preference for a maximized number of hours of clear skies to facilitate optical tracking. The areas in the country with the highest average number of hours of clear skies yearly are the Prairies, particularly the southernmost parts of Alberta, Saskatchewan and Manitoba. Those areas have as much as 25% more hours of clear skies than New Brunswick. Perhaps the Cold Lake site could be upgraded, though a more southerly location might be better. Another alternative, given the possibility of over-the-pole activities, is a location in the Northwest Territories. Considering, however, that many satellites have orbits taking them over the Eastern Seaboard, an additional eastern location could be proposed, although the St. Margaret's site could easily handle the traffic if upgraded. In any instance, if additional GEODSS systems are installed the burden on existing sites would be eased and the accuracy of the data received would be increased.

Satellite verification proposals might be expanded to include GEODSS, radar, lidar and other tracking systems. Soon, one satellite system may be able to detect individual aircraft from space. Its ability to locate airborne ASAT flights would certainly further stabilize the space-based arms control situation. Such information would be invaluable to verification systems as well.

Arms control verification goes to the heart of any ACD agreement because it addresses both compliance and confidence. In terms of the outer space issue it is clear that new types of multilateral verification should be critically examined. This study recognizes that the application of ground-based remote sensing techniques to the problem of arms control verification in space does not constitute a viable system in and of itself. It will be an effective component, however, of an integrated system. Canada appears to be well positioned to make significant contributions to discussions on verification in outer space. It has the technical means and expertise to design and operate a space-based verification system. It has, as well, a considerable capacity to contribute to ground-based verification studies on an international scale and possesses the necessary technical means, manpower and facilities to remain in such a position for long-term goals. Astronomy is one of Canada's prized scientific strengths. It could be mobilized to contribute both conceptually and practically to verification research associated with outer space. Much will depend upon the likelihood of significant outer space treaties agreed to by nations having considerable assets in space and a determination of how far Canada should proceed with others in developing a verification capability given the rapid evolution of space utilization.

Appendix 1: Satellite Tracking Sites in the GEODSS File

Appendix 2 : Major Canadian Astronomical Institutions

British Columbia

- Dominion Radio Astronomy Observatory, National Research Council, Penticton; 26-metre reflector.
- Dominion Astrophysical Observatory, Victoria; 1.75-metre reflector.

Ontario

- Algonquin Radio Observatory, Lake Traverse.
- David Dunlap Observatory, Richmond Hill; 1.8-metre reflector.

Quebec

- Observatoire Mont Megantic, Comt Compton; 1.6-metre reflector.

Nova Scotia

- Burke-Gaffney Observatory, Halifax.

• • • • • •

In addition to professional institutions, there exist a number of amateur observatories, amateur only in the sense of being involved in non-academic research, not in the quality of work performed. The Royal Astronomical Society of Canada has 2,600 members nationwide, with 20 local centres in major cities. Most centres have operational observatories with small-to-medium telescopes. In addition, many members possess personal instruments. Estimates of the number of RASC telescopes in operation at any one time range between 500 and 750.

As well, most major universities have at least a few telescopes for instruction.

For further information on Canadian instruments, the reader is referred to: Gall, J. *Astronomical Directory*, Gall Publications, Toronto, 1978, pp. 13-17.

Arms Control Verification Studies

No. 1 *A Conceptual Working Paper on Arms Control Verification*, by F.R. Clemenson and E. Gilman, January 1986

Le rôle des instruments astronomiques dans la vérification aux fins du contrôle des armements

par

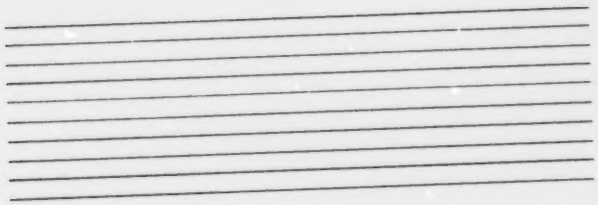
Chris A. Rutkowski
Université du Manitoba

Étude présentée à

La Direction du contrôle des armements et du désarmement

Ministère des Affaires extérieures
Ottawa (Canada)

Étude sur le contrôle des armements n° 2



Probablement le premier instrument astronomique à être utilisé au Canada, l'astrolabe de Samuel de Champlain, le père de la Nouvelle-France et donc du Canada, avait été perdu lors d'un voyage d'exploration près d'Ottawa en 1613. Il a été retrouvé 254 ans plus tard, en 1867, et une statue (page de couverture) érigée à quelques pas de la colline parlementaire et surplombant la rivière des Outaouais en perpétue le souvenir.

Le graphique en page couverture symbolise le dialogue permanent sur le contrôle des armements et le désarmement qu'entretiennent les Canadiens entre eux et celui qu'ils établissent avec la communauté internationale.

Études sur le contrôle des armements et le désarmement

La Direction du contrôle des armements et du désarmement du ministère des Affaires extérieures publie périodiquement des études sur le contrôle des armements et le désarmement afin de diffuser, dans le cadre des travaux suivis que le ministère effectue dans ce domaine, les résultats de recherches indépendantes réalisées pour le compte de ce dernier.

Les opinions exprimées dans ces rapports sont personnelles et ne reflètent pas nécessairement celles du ministère des Affaires extérieures ou du gouvernement du Canada.

An English abstract of this study can be found on page (i) of this document.

An English version of this study is available. To obtain a copy, please contact:

Arms Control and Disarmament Division
Department of External Affairs
Tower A, 6th Floor
125 Sussex Drive
Ottawa, Ontario
Canada
K1A 0G2

Le rôle des instruments astronomiques dans la vérification aux fins du contrôle des armements

par

Chris A. Rutkowski
Université du Manitoba

Étude présentée à

La Direction du contrôle des armements et du désarmement

Ministère des Affaires extérieures
Ottawa (Canada)

ERRATA

Le rôle des instruments astronomiques dans la vérification aux fins du contrôle des armements

Page couverture: (en bas à droite) "Étude sur le contrôle des armements nº 2" devrait être remplacé par "Étude sur la vérification du contrôle des armements nº 2".

Couverture avant intérieure: (en bas à gauche) Remplacer le tout par le texte suivant:

Études sur la vérification du contrôle des armements

La Direction du contrôle des armements et du désarmement du ministère des Affaires extérieures publie périodiquement des études sur la vérification du contrôle des armements afin de diffuser, dans le cadre des travaux suivis que le Ministère effectue dans ce domaine, les résultats de recherches indépendantes réalisées pour le compte de ce dernier.

Les opinions exprimées dans ces rapports sont personnelles et ne reflètent pas nécessairement celles du ministère des Affaires extérieures ou du gouvernement du Canada.

© Ministère des Affaires extérieures
Septembre 1986
ISSN 0828-3931

Table des matières

		Page
Résumé		i
Abstract		i
Introduction		ii
Chapitre premier :	Observation visuelle des satellites	1
Chapitre deux :	Observation photographique des satellites	2
Chapitre trois :	Observation photométrique des satellites	3
Chapitre quatre :	Surveillance électro-optique de l'espace lointain (GEODSS) à partir d'une base terrestre	5
Chapitre cinq :	Résolution des objets spatiaux	7
Chapitre six :	Armes basées dans l'espace	9
Chapitre sept :	Vérification des systèmes spatiaux	13
Chapitre huit :	Sommaire	15
Chapitre neuf :	Le Canada et les systèmes de vérification de l'espace à partir de bases terrestres	17
Annexe 1 :	Stations de poursuite des satellites	18
Annexe 2 :	Principaux établissements astronomiques au Canada	19

Résumé

L'emploi des instruments et des méthodes astronomiques se répand dans la recherche spatiale à des fins militaires. En outre, il y a de nombreuses possibilités d'application de ces mêmes techniques à la vérification des accords de contrôle des armements ayant trait aux armes basées dans l'espace ainsi qu'au déploiement terrestre de troupes et d'armes.

L'auteur décrit les premiers programmes de poursuite des satellites, dont le réseau «Moonwatch», qui prévoyait des observations visuelles par des civils, le système de caméra Baker-Nunn, les réseaux d'observation photométriques et le système de Surveillance terrestre électro-optique de l'espace lointain (GEODSS = Ground Based Electro-Optical Deep Space Surveillance). Suit alors une brève section sur la capacité de résolution de divers systèmes optiques et radars.

L'auteur examine ensuite l'évolution des armes basées dans l'espace, notamment les systèmes de bombardement à orbite fractionnaire (FOBS = Fractional Orbital Bombardment Systems) ainsi que les armes à énergie dirigée et autres armes anti-satellites (ASAT), puis il passe en revue les accords internationaux concernant la militarisation de l'espace et examine le rôle que jouent les systèmes terrestres et spatiaux dans la surveillance de ces accords et autres traités.

Voici quelques-unes des conclusions de l'auteur :

1. La poursuite des satellites prendra vraisemblablement plus d'importance à mesure qu'augmentera l'utilisation de l'espace à des fins militaires.
2. Des propositions visant la vérification du contrôle des armements dans l'espace devraient comprendre l'utilisation de la technologie sur le même plan que les systèmes devant être vérifiés.
3. Vu que les caméras Baker-Nunn qui étaient utilisées à des fins militaires sont remplacées par des systèmes électro-optiques, leur transfert à des établissements se spécialisant dans le domaine de l'astronomie serait fort utile à la mise au point de techniques de vérification dans le secteur académique.
4. Les institutions scientifiques devraient pouvoir profiter, à partir de la technologie astronomique militaire, de retombées pour la poursuite des astéroïdes, la résolution des étoiles binaires, l'étude des quasars et d'autres projets.
5. Le Canada est bien placé pour contribuer aux études sur la vérification à partir de la Terre, à l'échelle internationale; il possède les moyens techniques, la main-d'oeuvre et les installations nécessaires pour garder cette position de façon permanente.
6. Si de nouvelles stations GEODSS étaient mises sur pied il serait bon de considérer le Canada comme site éventuel.
7. L'astronomie canadienne, l'un de nos atouts scientifiques les plus précieux, manque de matériel moderne. Si le Canada participe à des projets de technologie avancée, une des retombées de cette participation serait l'application de la technologie astronomique à la vérification des accords sur le contrôle des armements.

Abstract

Astronomical instruments and methods have become increasingly used in military space research. It is also quite possible to use these same techniques for verifying arms control agreements related to space-based weapons and ground-based deployment of troops and weapons.

Early satellite tracking programs are described, including: "MOONWATCH" which involved the use of civilians making visual observations, the Baker-Nunn camera system, photometric observation systems and the Ground-Based Electro-Optical Deep Space Surveillance (GEODSS) system. There follows a short section outlining the resolution potential of various optical and radar systems.

The author then discusses developments in the area of space-based weapons, including Fractional Orbital Bombardment Systems (FOBS) as well as Directed Energy and other Anti-Satellite (ASAT) weapons. International agreements relating to the militarization of

space are reviewed and the role of ground-based and space-based systems for monitoring these and other treaties is reviewed.

Among the author's observations are:

1. Satellite tracking is likely to become more important as the military use of space increases.
2. Proposals for arms control verification in space should include the use of technology at the same level as the systems to be verified.
3. As Baker-Nunn cameras used by the military are replaced by electro-optical systems, their transfer to astronomical institutions would be useful in the development of verification techniques in the academic sector.
4. Spin-offs from military astronomical technology development should be realized by scientific institutions for asteroid tracking, binary-star resolution, quasar studies and other projects.
5. Canada stands in a good position to contribute to ground-based verification studies on an international scale and possesses the necessary technical means, manpower and facilities to remain in such a position for the long term.
6. If additional GEODSS stations were to be established, it would be useful to consider Canada as a possible site.
7. Canadian astronomy, one of Canada's most prized scientific strengths, has been undermined by lack of modern equipment. If Canada participates in advanced technology projects, one spin-off advantage of such participation could be the application of astronomical technology to the verification of arms control agreements.

Introduction

On dit que l'ère spatiale a commencé dès le lancement du premier spoutnik en 1957. Depuis lors, de nombreuses charges utiles ont été placées en orbite, le nombre d'objets actuellement satellisés se chiffrant à quelque 5 000.

Avec le déploiement de satellites et de plates-formes spatiales à des fins militaires, les astronomes ont constaté, dans leur chasse-gardée, une «invasion» à des fins non scientifiques. Puisque de nombreuses applications font appel à des techniques d'observation, il ne faut guère s'étonner que les instruments et les méthodes astronomiques soient de plus en plus utilisés dans la recherche spatiale militaire.

Aux aspects militaires de l'astronomie s'ajoute la possibilité d'utiliser ces mêmes techniques pour faciliter la vérification des systèmes d'armes basés dans l'espace et du déploiement terrestre de troupes et d'armes. Cette possibilité n'est pas sans avenir, malgré certaines limites dictées par les politiques de défense et les accords sur le contrôle des armements.

Chapitre premier

Observation visuelle des satellites

En juillet 1956, le *Smithsonian Astrophysical Observatory* (SAO) émettait son premier *Bulletin for Visual Observers of Satellites* (bulletin pour les observateurs visuels de satellites) à titre de guide pour les astronomes amateurs inscrits au programme d'observation visuelle, qui ne portait pas encore de nom à ce moment-là. Baptisé par la suite «MOONWATCH», ce programme devait aider le SAO à effectuer la surveillance préliminaire des satellites lancés au cours de l'Année géophysique internationale. Les télescopes Baker-Nunn étaient alors en voie de mise au point pour la poursuite photographique, mais il fallait d'abord connaître la trajectoire orbitale initiale avant de pouvoir les utiliser. Chaque fois que possible, on faisait également appel à la radio-poursuite, malgré le manque de fiabilité connu des ensembles d'instruments, et on utilisait des moyens optiques pour retrouver les satellites «perdus». L'observation optique constituait donc un élément essentiel des premiers efforts de poursuite des satellites.

C'est l'arrivée du spoutnik soviétique en octobre 1957 qui a révélé toute la valeur du programme MOONWATCH. Dans le bulletin de mars 1958, le directeur associé du programme, J. Allen Hynek (qui, par un drôle de hasard, est mieux connu pour sa participation aux recherches sur les OVNI), précisait que «l'apparition inattendue des spoutniks soviétiques et leur forte inclinaison à l'équateur ont obligé les équipes MOONWATCH à jouer le rôle de stations de poursuite intérimaires en attendant que soit mis en place l'ensemble de nos caméras haute précision pour la poursuite des satellites».[1] En fait, le problème était un peu plus complexe. Les lancements soviétiques se faisaient à une inclinaison orbitale qui était précisément la «mauvaise» pour de nombreuses stations MOONWATCH ainsi que pour les caméras Baker-Nunn déjà installées. On a donc rapidement mis en place des stations correspondant à ces inclinaisons orbitales plus fortes.

En principe, les observations optiques sont plus précises que les mesures radio à cause de la distorsion ionosphérique, bien que l'on utilise en pratique des mécanismes de compensation pour la poursuite radio. En éliminant l'erreur humaine, on augmente de beaucoup la précision des observations; la mise au point des caméras Baker-Nunn représentait donc un grand pas en avant. Le programme MOONWATCH n'a cependant été annulé officiellement que le 30 juin 1975, après avoir été éliminé progressivement au fil des années. Ce programme a livré une foule de renseignements précieux; son apport le plus remarquable ayant probablement été l'observation et la récupération du Spoutnik 4 lors de sa rentrée dans l'atmosphère au-dessus du Wisconsin le 5 septembre 1962. D'autres données du programme MOONWATCH provenaient d'un réseau composé de pilotes de lignes qui ont fait bénévolement plus de 4 000 observations de satellites et de météores.[2]

Lorsqu'on y a mis fin, le programme MOONWATCH comptait encore 100 stations actives. C'était l'élément le moins cher du programme spatial, n'ayant coûté que 14 millions de dollars pendant son existence. C'est là un fait important, surtout qu'à l'origine il ne devait durer que 18 mois. En réalité, il aura duré 18 ans, fournissant des renseignements précieux sur les satellites tout au long de son existence.[3]

Il faut signaler également la poursuite des satellites par divers groupes de radioamateurs, dont un en particulier, celui de Kettering, en

1 Voir Hynek, J.A. *Bulletin for Visual Observers of Satellites*. N° 8, mai 1958. (Dans: *Sky and Telescope*, v. 17, n° 3, sept. 1975, pp. 160-163.

2 On trouvera une histoire du programme MOONWATCH dans Cornell, J. "The MOONWATCH Era Ends", *Sky and Telescope*, v. 50, n° 3, sept. 1975, pp. 160-163.

3 De nombreux astronomes canadiens ont participé au programme MOONWATCH. Les détails sur la participation du Centre de Winnipeg de la Société royale d'astronomie du Canada, par exemple, figurent dans Hladiuk, D., "Project MOONWATCH", dans : Belfield, P., éditeur, *A History of the Winnipeg Centre, RASC, 1911-1977*, ch. 3, SRAC, Winnipeg, 1977.

Chapitre deux

Observation photographique des satellites

Angleterre, qui a connu beaucoup de succès en surveillant la télémétrie des satellites et en en faisant l'interprétation pendant plusieurs années. C'est le groupe de Kettering qui a révélé toute l'utilité des amateurs, en découvrant le site de lancement soviétique secret de Plesetsk, dont les experts occidentaux n'avaient que soupçonné l'existence. Qui plus est, le groupe a accompli son exploit au moyen de récepteurs à ondes courtes disponibles sur le marché.[4]

La caméra Baker-Nunn a été mise au point à peu près à la même époque que le programme MOONWATCH. Son système optique a été conçu par James G. Baker, qui était l'inventeur de la caméra Super-Schmidt destinée à photographier les météores. Le support et le mécanisme d'entraînement sont l'œuvre de Joseph Nunn. Douze caméras de ce type ont été fabriquées par la *Perkin-Elmer Corporation*, au Connecticut, et installées à divers endroits du globe. La première est entrée en service au Nouveau-Mexique en novembre 1957, un mois après le lancement de *Spoutnik 1*. Ce mois-là, les données orbitales n'étaient disponibles qu'à partir des stations MOONWATCH, et c'est probablement ce qui a provoqué l'évolution rapide d'une technologie de poursuite des satellites dans les années qui ont suivi.

Les systèmes Baker-Nunn conviennent surtout à la détection des satellites à haute altitude, jusqu'à 40 000 kilomètres ou plus, et c'est pourquoi ils constituent un complément aux systèmes de poursuite radar, qui se limitent à des altitudes inférieures à 7 000 km. Les systèmes Baker-Nunn sont passifs, car ils détectent la lumière réfléchie des satellites, avec les étoiles en arrière-plan. À partir d'un ensemble général de coordonnées, on prend une photo, on compare les objets qui y figurent à une carte du ciel, au moyen d'un transparent, puis on note la position du satellite. Grâce à des photographies successives, on peut déterminer l'orbite du satellite à 30 secondes d'arc près, et dans certains cas, à 2 ou 3 secondes d'arc près. La position du satellite est ensuite signalée au *Space Defence Centre* (Centre de défense spatiale), pour mise à jour du catalogue informatisé de NORAD.[5]

Le principal problème du système Baker-Nunn est le délai de développement du film, qui peut atteindre 90 minutes, ce qui est certainement inadéquat pour la poursuite rapide et la

4 Dernièrement, on a consacré beaucoup d'attention au groupe de Kettering. On trouvera un résumé de ses activités et des sommaires bibliographiques dans : Peebles, C. "Satellite Radio Tracking for the Amateur", *Spaceflight*, v. 25, déc. 1983, pp. 459-60; et dans Solomon, S. "Eavesdropping on Soviet Satellites", *Science Digest*, v. 92, nº 1, janv. 1984, pp. 32, 36, 81.

5 On a publié diverses études sur le système Baker-Nunn. Par exemple, voir Solomon, L.H. "Some Results at Baker-Nunn Tracking Stations", *SAO Special Report*, nº 244, 1967.

Chapitre trois

Observation photométrique des satellites

détermination de l'orbite, puisque certains satellites peuvent changer d'orbite dans un délai plus court. Dans l'idéal, on devrait disposer de données beaucoup plus rapidement, en temps quasi réel, pour déceler rapidement tout changement d'orbite.

La magnitude limite (c'est-à-dire la magnitude apparente la moins brillante que l'on puisse encore observer) de la caméra Baker-Nunn est un facteur qui doit également entrer en ligne de compte lorsqu'on envisage de l'utiliser pour poursuivre des satellites. Cette magnitude limite est fonction de plusieurs variables, dont la distance zénithale, la vitesse angulaire de l'objet photographié, sa magnitude visuelle et la sensibilité de l'émulsion du film. La durée d'exposition, qui est inversement proportionnelle à la magnitude, est un autre facteur à considérer. Si l'on prend comme norme une exposition d'une seconde, la magnitude visuelle varie de m = 12 à m = 14, selon le film utilisé, qui, dans de nombreuses stations, était du Kodak Royal-X Pan.[6]

La plupart des satellites ont des magnitudes se situant autour de 14; ils se trouvent donc dans la gamme limite du système Baker-Nunn (la magnitude limite de l'œil humain est d'environ 7,5).

La poursuite des satellites a rapidement fait ressortir le problème de la capacité de détection et diverses solutions possibles ont été examinées. Les chercheurs soviétiques ont été parmi les premiers — c'est-à-dire dès 1960 — à chercher des moyens de poursuite non photographiques.[7]

Le support d'enregistrement, composé d'un compteur de photons branché sur un ordinateur, constitue la seule différence entre le matériel d'un système de poursuite photométrique et celui d'un système photographique. Ces dispositifs sont comparables à ceux utilisés dans la recherche astronomique pour examiner des objets lointains, comme les quasars. À l'encontre des stations photographiques, cependant, les systèmes photométriques exigent des mécanismes de poursuite plus polyvalents à cause de la faible superficie de la photocathode. Il s'agit là d'un facteur important lorsqu'on veut poursuivre des objets d'une magnitude inférieure à 11.

La participation du Canada a pris de l'ampleur avec l'inauguration officielle, le 9 novembre 1976, de l'Unité de pistage et d'identification des satellites (UPIS), à la Station des Forces canadiennes de St. Margaret, près de Moncton, au Nouveau-Brunswick. L'élément central de cette unité est un télescope Cassegrain f/16 de 61 cm, monté sur un support triaxial Baker-Nunn modifié. Cette installation visait à remplacer le système photographique Baker-Nunn de Cold Lake, en Alberta, et venait après 10 années d'essais rigoureux à la *USAF Avionics Laboratory*, à la base aérienne Wright-Patterson. La lumière de l'objet observé traverse le système optique du télescope jusqu'à la photocathode, qui convertit les photons incidents en électrons. Ces impulsions électroniques sont alors enregistrées sur papier ou sur bande magnétique, aux fins de traitement ultérieur; on peut également les acheminer par lignes téléphoniques au NORAD, où elles sont analysées.[8]

6 On trouvera une description plutôt détaillée des systèmes de poursuite optique et photographique dans Veis, G. "Optical Tracking of Artificial Satellites", *Space Science Reviews*, v. 2, 1963, pp. 250-296.

7 Le grand astronome russe I.S. Shklovskii a décrit la poursuite photométrique dans "Optical Methods for the Observation of Artificial Earth Satellites", *Artificial Earth Satellites*, v. 1, 1960, pp. 55-63.

8 Kissell, K.E. et Mavko, G.E., *The Canadian Forces/NORAD Satellite Identification Sensor at St. Margaret's*, USAF Avionics Lab, Wright-Patterson AFB, Ohio, AFAL TR-77-189.

Face au nombre croissant de satellites en orbite, la nécessité d'une unité de poursuite supplémentaire, comme la station de St. Margaret, était évidente. Cette dernière était aussi renommée pour ses caractéristiques «semi-automatiques».

En plus du système photométrique à St. Margaret, il y a une caméra Baker-Nunn prêtée par le *Smithsonian Astrophysical Observatory* à Alisfantsfontaine, en Afrique du Sud. Cette caméra peut contenir 1 000 pieds linéaires de film qui peuvent être traités à l'UPIS à raison de 5½ pieds à la minute. Ce système photographique est censé pouvoir détecter «un ballon de basketball à une distance d'environ 20 000 milles».[9]

L'interprétation des mesures photométriques des satellites a fourni aux chercheurs scientifiques une vaste quantité de données comprenant, entre autres, des révélations sur la densité de l'atmosphère terrestre ainsi que de sa composition réelle. Ces données permettent également de tirer facilement des renseignements scientifiques sur les satellites eux-mêmes. On peut déterminer la vitesse de rotation d'un satellite, sa forme, sa grandeur ainsi que les propriétés réfléchissantes de sa surface. Les fluctuations de la luminosité ont été notées en premier par ceux qui observaient les fusées auxiliaires, ce qui simplifiait l'estimation de l'attitude et de la vie utile du satellite.

De nombreuses études ont été effectuées sur les satellites. Basées sur diverses observations, elles permettaient un calcul détaillé de leur orbite. Par exemple, entre mai 1971 et juin 1972, on a compilé pour le Cosmos 387 plus de 1 500 observations optiques et radars, obtenues au moyen notamment de caméras Hewitt (une variante du système Baker-Nunn), de kinéthéodolites, de stations MOONWATCH et d'installations radars. C'est en combinant toutes ces observations que l'on a pu obtenir un tracé extrêmement précis de l'orbite. (Le Cosmos 387 a été lancé de Plesetsk en tant que charge utile non annoncée; sa magnitude visuelle de 6 en fait un objet relativement facile à poursuivre).[10]

Les stations de poursuite optique ont permis de dresser des listes de satellites et de leurs magnitudes. En extrapolant et en analysant ces listes, on a pu identifier la forme et la taille des satellites observés et ainsi obtenir des renseignements détaillés sur des charges utiles secrètes ou non précisées. Par exemple, l'observation du «taux de clignotement» fournit des renseignements sur le culbutage des corps de fusées, ce qui a permis de refaire avec précision l'historique de nombreux satellites et de leurs fusées. C'est grâce à ces données que l'on peut déterminer si une mission satellitaire, annoncée ou non, a été couronnée de succès ou s'est soldée par un échec. La précision des déterminations orbitales au moyen d'observations visuelles est généralement de l'ordre de quelques mètres.

Une photographie souvent publiée montrait clairement l'aspect de «tête de marteau» du *Spoutnik 2*, bien qu'elle ait été prise au moyen d'un télescope de poursuite de 24 pouces avec longueur focale de 500 pouces, qui a réussi à capter le satellite à une distance de 200 milles.[11] La photographie a été prise en 1957 au moyen d'un système purement optique. Les mesures satellitaires et les systèmes de reproduction d'image des années 1980 sont beaucoup plus perfectionnés.

9 Wooding, B. et Spruston, T.A. "The Canadian Armed Forces and the Space Mission", *Canadian Defense Quarterly*, v. 5, nº 2, hiver, 1975, pp. 15-20.

10 De nombreuses études sur des satellites précis ont été publiées dans le journal *Planetary and Space Science*. En particulier, King-Hele et Pilkington ont présenté des analyses détaillées de la poursuite optique. Voir King-Hele, D.G., "Analysis of the Orbit of Cosmos 387 (1970-111A). Near 15th-order Resonance", *Planetary and Space Science*, v. 22, pp. 509-524; et Pilkington, J.A. "The Visual Appearance of Artificial Satellites", *Planetary and Space Science*, v. 14, 1966, pp. 1281-1289.

11 Publié par Stine, G.H. "How the Soviets Did It in Space", *Analog*, v. 81, nº 6, août 1968, pp. 48-71.

Chapitre quatre

Surveillance électro-optique de l'espace lointain (GEODSS) à partir d'une base terrestre

Au cours des années 1960, les responsables de la poursuite des satellites se sont rendus compte de certains problèmes inhérents aux systemes de poursuite classiques. Le radar n'offrait pas une résolution ou une portée suffisante pour satisfaire aux programmes à venir, qui allaient exiger une surveillance très détaillée des satellites. De même, la précision, la sensibilité et la vitesse des systèmes optiques étaient insuffisantes. Leur incapacité de fonctionner en temps réel constituait un problème majeur. Cependant, au cours des années 1970, avec l'évolution de la technologie des diodes au silicium et l'arrivée de l'ère des microprocesseurs, plusieurs laboratoires se virent confier la tâche de concevoir un système photoélectrique pour la poursuite des satellites en temps réel. Un prototype a été accepté en 1974, et en septembre 1975 un site d'essai expérimental était aménagé au champ de tir d'engins de White Sands, près de Socorro, au Nouveau-Mexique. C'était la première station du programme GEODSS élaborée par le *USAF Systems Command*. En 1979, on établissait à 62 millions de dollars le coût d'installation d'un réseau comprenant cinq stations. La deuxième et la troisième stations se trouvent à Taegu, en Corée du Sud, et sur l'île Maui, à Hawaii. Une quatrième est actuellement en construction sur l'île de Diego Garcia dans l'océan Indien. On prévoit que la construction d'une cinquième station commencera d'ici 1985 «quelque part dans l'Atlantique est, à zéro degré de longitude», peut-être au Portugal ou sur l'île de l'Ascension. (Les plans d'origine pour les quatrième et cinquième stations GEODSS prévoyaient leur installation en Iran et au Maroc.)[12] Le système GEODSS s'est vu confier cinq missions principales : 1) détection initiale, 2) poursuite, 3) tenue du catalogue, 4) collecte de données de luminosité et 5) autres tâches classifiées. La première station a un télescope principal doté d'un miroir de 31 pouces; il s'agit d'une unité de f/5 avec un champ de 1 degré sur une plaque de 80 mm. Le télescope auxiliaire est un Schmidt de 14 pouces f/1,7, avec champ de 7 degrés.

L'exploitation du système commence après le crépuscule; en utilisant les données du fichier, on procède à l'étalonnage sur une étoile qui se trouve près de la zone de recherche probable. Au besoin, on apporte des corrections, puis on obtient des données sur la luminosité du ciel nocturne et le coefficient d'extinction atmosphérique (nécessaire pour la mesure précise de la luminosité). Ce procédé prend une quinzaine de minutes, après quoi on rappelle du fichier informatique le satellite que l'on veut observer. La rotation se fait rapidement afin que la cible se trouve en position en une seconde environ. Si le satellite désiré est détecté immédiatement, sa position est notée et le catalogue est mis à jour. On peut aussi poursuivre le satellite automatiquement et enregistrer son mouvement, soit à partir de son seul rayonnement vidéo, soit au moyen d'un photomultiplicateur à l'arséniure de gallium.

Si le satellite n'est pas détecté, on amorce des programmes de recherche qui continuent jusqu'à ce qu'on le trouve. Les programmes sont mis en mémoire dans le matériel qui se trouve sur le site, c'est-à-dire un MODCOMP IV-25 à mémoire centrale de 256 kilo-octets; la capacité du disque est de 25 méga-octets. On peut accéder facilement à deux fichiers princi

12 Des détails sur le fonctionnement et la mise au point du système GEODSS ont été présentés dans de nombreuses publications. On trouvera un résumé de bonne qualité et de lecture facile, dans Beatty, J.K. "The GEODSS Difference", *Sky and Telescope*, v. 63, nº 5, pp. 469-473. Autre source importante : Smith, B.A. "Ground-Based Electro-Optical Deep Space Surveillance System Passes Reviews", *Aviation Week and Space Technology*, 27 août 1979, pp. 48-53. Un nombre considérable de documents ont été publiés par le Lexington Lincoln Lab. du MIT, Electronic Systems Division, à la base aérienne Hanscom. On trouvera un bon aperçu de niveau semi-technique dans Weber, R. "Passive Ground-Based Electro-Optical Detection of Artificial Earth Satellites", *Optical Engineering*, v. 18, nº 1, 1979, pp. 82-91. Voici quelques rapports techniques du MIT ayant trait au GEODSS, utilisés comme références dans ce qui suit : ESD TR-77-125; 78-33; 78-270; 79-277; 79-326; et 79-350.

paux; l'un est un catalogue de satellites à 400 éléments, l'autre étant le catalogue d'étoiles du SAO, qui contient plus de 250 000 entrées. Les catalogues et le matériel font l'objet de mises à jour et de modifications continuelles.

Ce système utilise deux types d'éliminateurs d'échos fixes (MTI = *Moving Target Indicator*) : l'un est semi-automatique, l'autre complètement automatique (MTI et AMTI). Dans le système MTI, un enregistreur à vidéodisque enregistre et restitue le signal de retour, avec un retard de 1 à 4 secondes, ce qui met facilement en évidence les satellites qui se déplacent. Dans le système AMTI, un logiciel appelé «ASTROSO» (*Adaptive Software to Recognize Orbiting Space Objects* = Logiciel d'adaptation permettant de reconnaître les objets spatiaux en orbite) compare automatiquement des trames successives et signale les «menaces» révélées par leur mouvement relativement à l'arrière-plan.

Le type de détecteur utilisé pour le système GEODSS est un Ebsicon; qui est le nom générique donné à n'importe quel tube analyseur contenant une mire à diode au silicium qui, exposée à un bombardement de photons, produit un signal électronique. On augmente considérablement la capacité de détection en branchant sur le détecteur Ebsicon un convertisseur d'images à une seule étape.

La signature de satellite utilisée par les systèmes d'identification des objets spatiaux (IOS), est obtenue à partir de l'ensemble de ses variations de luminosité à mesure que celui-ci tourne sur lui-même et se déplace autour de la Terre. Ces signatures sont mises en mémoire et on peut les rappeler lorsqu'on veut faire une comparaison. Un changement de signature est un signe avertisseur : le satellite vient d'être réorienté ou réactivé. Nous examinerons plus loin l'utilisation de cette information.

Les stations autres que celle de White Sands possèdent des systèmes optiques légèrement plus importants, chacun étant doté de deux télescopes principaux de 1 mètre, avec longueur focale de 2,2 mètres et un champ de 2,1 degrés. De plus, chaque site possède un troisième télescope auxiliaire de 0,4 mètre avec un champ de 6 degrés. Chaque télescope est doté d'un tube Ebsicon de 80 mm avec une mire de 32 mm. Ces télescopes principaux ont une magnitude limite normale de 16, bien qu'on puisse les «pousser» juqu'à 18,5. Les systèmes auxiliaires ont une magnitude limite de 14,5 seulement, mais à cause de leur champ plus large et de leur pivotement plus rapide ils servent, de manière sélective, à l'observation des satellites de reconnaissance à faible altitude.

Par ailleurs, chaque site possède un zoom vidéo permettant de se concentrer sur un secteur particulier de l'écran, afin d'aider l'opérateur. L'incorporation d'un radiomètre pour surveiller l'émission infrarouge des satellites présente un intérêt particulier, car celui-ci permet de distinguer les satellites les uns des autres et ainsi de les classer comme charges utiles, lanceurs ou fragments.[13]

Bien que ce soit le mouvement des satellites qui en révèle la présence (par exemple, un satellite géosynchrone se déplace de 15 secondes d'arc par seconde), on peut identifier les satellites apparemment stationnaires ayant une vitesse de révolution sidérale en les comparant aux catalogues d'étoiles, mais ce n'est pas chose facile.

L'annexe 1 précise les endroits où il y a des stations de poursuite utilisées ou enregistrées par GEODSS.

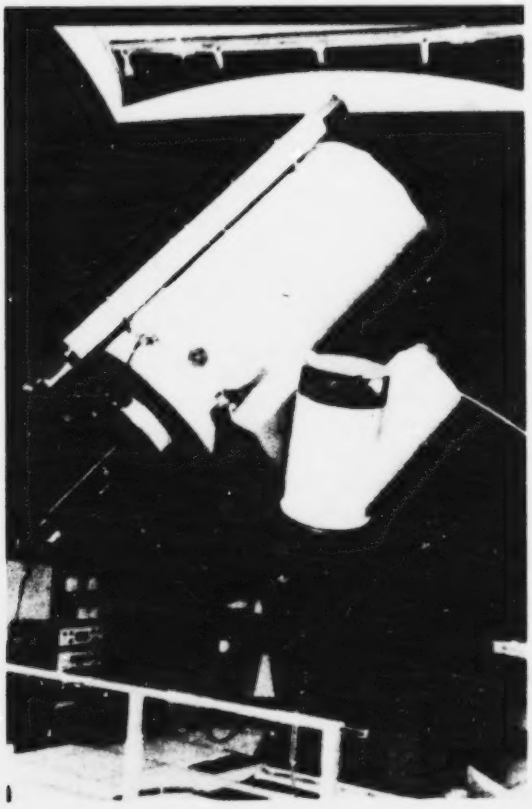
Dernièrement, les sites GEODSS ont fait l'objet d'une modernisation supplémentaire afin de pouvoir utiliser les ordinateurs PDP 11-

13 McNamara, F.L. et Krag, W.E. "Radiometers for Measurements of Space Objects", MIT Electronic Systems Division, TR-79-9.

Chapitre cinq

Résolution des objets spatiaux

70 de la *Digital Equipment Corporation*. Le logiciel ASTROSO a fait l'objet de perfectionnement, tandis que le catalogue d'objets spatiaux résidents (RSOC = *Resident Space Object Catalog*) tenu par le Commandement de la défense aérospatiale de l'Amérique du Nord (NORAD) a été élargi et comprend maintenant plus de 1 000 entrées. L'identification des satellites peut se faire en six secondes, (l'analyse complète prend une minute), et leur position peut être déterminée à 10 secondes d'arc près.[14]



▲ Télescope principal du polygone d'essais expérimentaux GEODSS à la base aérienne de White Sands. Il a une ouverture de 31 pouces et il s'agit d'un système P/5. (Tiré de Weber, 1979).

Quels que soient le coût et le nombre d'années consacrés à leur mise au point, les systèmes d'observation optiques doivent se conformer aux lois de la physique. Leur pouvoir de résolution se heurte à certaines limites, que l'on détermine au moyen de calculs portant sur l'ouverture de la caméra et sur les objets observés.

On définit comme suit la magnitude limite de tout télescope :

$$m = 2{,}7 + 5 \log D$$

où D est le diamètre de l'ouverture en millimètres. La limite pour un système GEODSS ayant un miroir de 1 mètre de diamètre sera donc de m = 17,7, ce qui suffit pour distinguer la plupart des satellites.[15]

L'angle correspondant au plus petit pouvoir de résolution angulaire, qui est défini comme suit :

$$\phi = 120/D$$

et où ϕ est donné en secondes d'arc, est un autre facteur qui doit entrer en ligne de compte. Pour le même système GEODSS, cet angle sera donc en principe d'environ 0,12 seconde d'arc. Toutefois, ϕ est aussi limité par l'atmosphère terrestre, qui établit l'angle limite au sol à environ 0,5 seconde d'arc.

À titre d'exemple, prenons le cas du Molniya 1, vol 20, qui est un satellite de communications lancé de Plesetsk le 4 avril 1972. Son périgée est à une hauteur de 480 km, son apogée étant à presque 40 000 km. Le satellite est un cylindre

14 Randolph, A. "USAF Upgrades Deep Space Technology", *Aviation Week and Space Technology*, 28 fév. 1983, pp. 57-58.

15 Les limites examinées dans cette section ne sont que des valeurs approximatives et dépendent de nombreuses variables. En général, le plus petit angle susceptible de résolution est simplement la longueur d'onde divisée par l'ouverture. Parmi les sources de base de ces données figurent diverses publications astronomiques, par exemple, le *Guide de l'observateur* de la Société royale d'astronomie du Canada (1983). D'autres sources sont : Lambeck, K. "Probability of Recording Satellite Images Optically", *SAO Special Report*, nº 230, 1966; McCue, G.A., Williams, J.G. et Morford, J.M. "Optical Characteristics of Artificial Satellites", *Planetary and Space Science*, v. 19, 1971, pp. 851-868; et Veis, G. "Optical Tracking of Artificial Satellites", *Space Science Reviews*, v. 2, 1963, pp. 250-296. Chose curieuse, l'une des sources les plus utiles sur la détection et la résolution est l'ouvrage de Ayer, F. "Instrumentation for Unidentified Flying Object Searches", *dans*: Gillmor, D.S., éditeur, *Final report on the Scientific Study of Unidentified Flying Objects*, Bantam Books, N.Y., N.Y., 1969, pp. 761-804.

de 3,5 sur 1,7 mètres, doté de plusieurs capteurs solaires disposés en «roue à aubes» et de deux antennes paraboliques. Supposons qu'il présente une superficie de 3 mètres à une station GEODSS. Nous pouvons calculer son diamètre angulaire au moyen de l'équation :

$$d/h = \tan \phi$$

où d est le diamètre du satellite, h son altitude et ϕ son diamètre angulaire en degrés. Lorsque d = 3 m et h = 1 000 km, ϕ est de 0,00017 degré, soit 0,6 seconde d'arc, ce qui correspond bien à la capacité d'observation du système GEODSS défini dans l'exemple.

Donnons un autre exemple, mais cette fois d'une situation inverse. Prenons le satellite de reconnaissance «Big Bird» des États-Unis dont on dit qu'il est capable d'une résolution au sol (à partir de l'orbite) de 150 mm. Au plus petit pouvoir de résolution angulaire, lorsque ϕ est de 0,5 seconde d'arc, on peut calculer l'altitude comme étant au maximum de 61 km, ce qui est évidemment trop bas, car on sait que l'altitude maximale de *Big Bird* est d'environ 150 km, et que son périhélie ne peut être de 61 km, puisque cela le placerait à l'intérieur d'une région dense de l'atmosphère. Cependant, même pour une altitude de 100 km, la résolution sera de presque 0,25 mètre, qui demeure une valeur respectable (de l'ordre de 10 pouces).[16]

Dans le cas d'un système photographique, la résolution dépend aussi de l'émulsion. Dans des conditions parfaites, l'image d'un satellite est un disque de diamètre d, où

$$d = (2\lambda f)/D$$

Aux fins de ce calcul, λ est la longueur d'onde, f la longueur focale et D le diamètre d'ouverture de la caméra. Ainsi, pour une caméra Baker-Nunn ayant une longueur focale de 500 mm et une ouverture de 500 m, le diamètre d'une source ponctuelle sera, dans l'idéal, d'environ 3 microns. Cependant, à cause de l'effet des conditions de visibilité atmosphérique, ce diamètre est majoré d'un facteur de 10 environ, de sorte que d est généralement de 20 à 40 microns pour les émulsions rapides. Les progrès récents de la technologie de la télédétection ont réduit quelque peu ces valeurs, et on peut aujourd'hui obtenir de bonnes résolutions, inférieures à 10 microns, et souvent près de 2 à 3 microns. Une caméra Baker-Nunn peut photographier des étoiles de magnitude 14,5 avec une exposition de 20 secondes.

Le champ d'une caméra Baker-Nunn type est d'environ 30 degrés sur 5 degrés. L'échelle sur le film est d'environ 2,5 microns par seconde d'arc. En principe, la caméra sera donc capable de photographier un objet ayant un diamètre de

$$r = (2\lambda)/s$$

secondes d'arc, où s est l'échelle. Le pouvoir de résolution angulaire minimal correspond donc à environ 0,5 seconde d'arc.

La résolution des systèmes de poursuite radar doit également entrer en ligne de compte. Bien que ces systèmes, à l'encontre des méthodes photographiques, soient actifs plutôt que passifs, et bien qu'ils utilisent une autre partie du spectre électromagnétique, les principes fondamentaux qui les sous-tendent sont similaires à ceux des méthodes photographiques. Pour le radar, la résolution est définie par l'équation :

$$r = (70°\lambda)/D$$

où r est le pouvoir de résolution (c'est-à-dire la séparation minimale nécessaire entre deux objets, pour qu'on puisse les distinguer l'un de l'autre) et D est le diamètre de l'antenne. Pour un ensemble radar avec une antenne de 3 mètres de diamètre et une longueur d'onde type de 3 cm, la largeur du faisceau est de 0,7 degré d'arc. Par exemple, la distance maximale pour une antenne de 3 m serait d'environ 250 m. Par conséquent, deux objets situés l'un à côté de l'autre à des distances supérieures à 250 m apparaîtront comme un seul objet.

16 Les renseignements sur les satellites de reconnaissance photographique de la *USAF* et leurs contreparties soviétiques proviennent de : Bamford, J. *The Puzzle Palace*, Penguin, N.Y., N.Y., 1983; Brown, N. "Military Uses of Satellites", *dans*: Fishlock, D., éditeur, *A Guide to Earth Satellites*; Elsevier, N.Y., N.Y., 1971, pp. 121-133; Canan J. *War in Space*, Berkley Books, N.Y., N.Y., 1984; Clark, P.S. "Soviet Photoreconnaissance Satellites", *Spaceflight*, v. 25, nº 6, Karas, T. *The New High Ground*, Simon & Shuster, N.Y., N.Y., 1983; et Smolder, P.L. *Soviets in Space*, Butterworth Press, Guildford & Landon, 1973. De plus, les annuaires de la société *TRW Space Systems* de Californie ont fourni de nombreuses données pour étude.

Chapitre six

Armes basées dans l'espace

La résolution d'un objet spatial est fonction de plusieurs variables : 1) la longueur d'onde utilisée; 2) le système optique, 3) l'altitude de l'objet, 4) sa grandeur et sa forme, 5) sa luminosité, et 6) sa vitesse angulaire. Il est évident, par exemple, qu'une longueur d'onde de 570 nanomètres n'est pas appropriée pour observation pendant la journée ou par temps nuageux. Le pouvoir de résolution d'un système optique dépend de sa longueur focale et de son ouverture; dans l'idéal, la longueur focale doit dépasser la largeur d'ouverture. Il est aussi évident qu'un objet placé sur une orbite géostationnaire à haute altitude est plus difficile à poursuivre qu'un objet en orbite de reconnaissance à faible altitude. La taille de l'objet est directement liée à sa luminosité, cette dernière étant fonction à la fois de son albédo et de son angle de phase. Quant à l'angle de phase, il est fonction de la vitesse angulaire de l'objet, qui dépend elle-même de l'altitude. Le problème de l'observation des satellites se réduit donc à deux aspects seulement : le système d'observation et l'orbite (donc le but) du satellite. Les systèmes optiques et électro-optiques actuels peuvent observer tous les types de satellites et contribuer en temps réel au catalogue de satellites NORAD SPACETRACK. Les énormes radars à éléments multiples, comme la structure haute de 13 étages à la base aérienne de Elgin, en Floride, ont un pouvoir de résolution limité en ce qui concerne les satellites en orbite haute, mais ils sont capables de poursuivre une multitude de satellites plus bas au moyen de processeurs de données avancés. Par conséquent, les systèmes photométriques et photographiques sont essentiels, car ils permettent de compléter les observations radar. Par ailleurs, face à l'augmentation annuelle du nombre de charges utiles en orbite, on doit éviter à tout prix de surcharger l'un ou l'autre des systèmes, pour des raisons tant militaires que de navigation.[17]

Le 18 juin 1982, le Premier ministre Trudeau, lors de la deuxième Session extraordinaire des Nations Unies consacrée au désarmement (UNSSOD II), lançait un appel à la communauté mondiale en vue de la négociation d'un traité visant à interdire la mise au point, l'essai et le déploiement de toute arme dans l'espace extra-atmosphérique. On présume généralement qu'il n'y a pas à l'heure actuelle d'armes basées dans l'espace; il y a eu cependant — et il y a toujours — beaucoup de R-D dans ce domaine. Cet intérêt pour la possibilité «d'armer» l'espace (plutôt que pour la militarisation de l'espace, ou l'utilisation militaire de celui-ci) date d'assez longtemps. Par exemple, lorsque le COSMOS 139 soviétique a été lancé le 25 janvier 1967, on croyait qu'il s'agissait du premier vol d'essai d'un système de bombardement à orbite fractionnaire (FOBS).

En théorie, une arme FOBS serait lancée en orbite basse, se déplaçant au-delà de l'horizon vers les bases de bombardiers américains. Une fois arrivée à portée, ses rétrofusées s'allumeraient et l'arme tomberait vers sa cible avec une charge utile de 1 à 3 mégatonnes. En orbite, le FOBS ressemblerait à une charge utile ordinaire, et il lui faudrait peut-être une heure pour arriver à portée de sa cible. Une fois sorti de l'orbite, il ne permettrait qu'une alerte de 3 minutes, soit nettement moins que les 30 minutes d'avertissement pour les missiles balistiques intercontinentaux. Bien que la USAF possède des radars pour détection au-delà de l'horizon, qui font rebondir des ondes radio haute fréquence sur l'ionosphère et peuvent ainsi détecter les FOBS en orbite, ce radar peut être affecté par l'activité des taches solaires et il est de plus très sensible au brouillage. Les systèmes optiques sont beaucoup plus appropriés pour l'observation des FOBS. (Un scénario probable pour ce type d'arme comporterait des lancements multiples pour éliminer de nombreuses cibles. Bien qu'il soit difficile d'identifier un FOBS unique, il serait stratégi-

17 Voir Wooding, B. et Spruston, T.A. *op.cit.*, note 9.

quement improbable que l'on emploie une seule arme du genre; par conséquent, le délai d'avertissement serait peut-être encore plus long que pour les missiles balistiques intercontinentaux.)[18]

Bien que les FOBS soient opérationnels depuis de nombreuses années, la presse a choisi de décrire plus souvent un autre type d'arme spatiale, soit les armes à énergie dirigée (AED).

Même le secteur des lasers, où se fait le gros de la recherche dans le domaine des AED, a reçu des crédits relativement limités, le Pentagone ayant dépensé moins de 2 milliards de dollars depuis les années 1970 sur les armes laser à haute énergie. Cependant, les crédits pour la recherche sur les armes laser n'ont cessé de croître.[19] L'Union soviétique poursuit elle aussi la mise au point des armes à énergie dirigée. En fait, selon une certaine source, ses programmes de perfectionnement des armes laser seraient quatre ou cinq fois plus importants que ceux des États-Unis; et il semble qu'elle aurait un laser antisatellite, opérationnel à basse altitude, en place à Sharyshgan.[20]

Ces armes ont en effet un potentiel énorme. Un photon parcourt un trajet de 1 mille en 6 millionièmes de seconde, c'est-à-dire qu'un missile balistique intercontinental qui se déplace à une vitesse de Mach 6 à une distance de 1 600 km n'avancerait que de 3 mètres avant que le faisceau laser ne l'atteigne. Mais les choses ne sont pas aussi simples, car il ne suffit pas de pointer une arme au laser (à l'heure actuelle) sur les missiles balistiques pour les vaporiser. En effet, cela prend un certain temps pour que le faisceau perce le revêtement extérieur du missile. Cette étape franchie, le faisceau doit frapper une composante vitale, un circuit de guidage par exemple. De plus, lorsqu'il passe à travers l'atmosphère, le faisceau laser subit une légère divergence et une dispersion par l'atmosphère, ce qui prolonge le temps pendant lequel le faisceau doit rester sur la cible. Enfin, le mécanisme de visée et de dégagement doit être extrêmement précis afin de pointer le laser, de distinguer les cibles, de savoir quand une cible est détruite et passer à d'autres cibles.

Il est possible de se défendre contre les lasers, du moins dans une certaine mesure. Les missiles de croisière par exemple, sont des cibles difficiles à cause de leur trajectoire de vol irrégulière. Les composantes vitales des missiles balistiques intercontinentaux peuvent être protégées au moyen de matériaux fortement réflecteurs, prolongeant ainsi davantage la durée d'impact nécessaire sur le missile. Néanmoins, il n'y a aucun doute que l'espace représente le milieu idéal pour les armes au laser parce que la distortion atmosphérique du faisceau est éliminée. Par conséquent, des lasers montés sur une plate-forme spatiale pourraient servir à intercepter en vol les missiles balistiques intercontinentaux.

Les États-Unis procèdent actuellement à des recherches sur les AED, par l'intermédiaire de la *Defense Advanced Research Projects Agency* (DARPA) et ses programmes de technologie de la défense spatiale. Trois projets majeurs actuellement en cours — Talon Gold, ALPHA et LODE — sont tous reliés à la mise au point d'un laser basé dans l'espace. De plus, la *USAF* a jumelé un pointeur-poursuiveur Hughes et un laser à bord du *Airborne Laser Laboratory* (ALL). Ce laboratoire laser aéroporté, qui est très grand et d'une exceptionnelle facilité de manœuvre, occupe essentiellement toute la soute de l'avion. La *US Navy* et la *US Army* ont également des programmes laser, mais leur mise au point n'a pas encore atteint le niveau du programme de la *US Air Force*.

Le premier laser pratique vit le jour en 1960, lorsque deux chercheurs américains mirent au point le laser à rubis, qui ne générait qu'une puissance d'un watt. Le laser dynamique à gaz a été réalisé en 1967, et il produisait 100 watts. À peine un an plus tard, on mettait au point le laser à gaz carbonique, d'une puissance de 60 000 watts. C'est à peu près à cette époque que la DARPA a mis sur pied le *High Energy Laser Research Group* (HELRG) pour étudier l'emploi des lasers pour l'armement. Peu après,

18 Brownlow, C. "Soviets Prepare Space Weapon for 1968", *Aviation week and Space Technology*, 13 nov. 1967, pp. 30-31.

19 Source principale : Payne, K.B., éditeur, *Laser Weapons in Space*, Westview Press, Boulder, Colorado, 1983. Aussi : Canan, J. *op.cit.*, note 16.

20 Main, Roger P. "The USSR and Laser Weaponry: A view from Outside", Defence Systems Review v. 3, no. 3, 1985, pp. 67-80.

on a mis au point le laser à décharge électrique, suivi vers le milieu des années 1970 par le laser chimique capable de produire plusieurs mégawatts.

C'est en 1973 qu'eut lieu la première démonstration réussie d'une arme au laser, aux installations du HELRG à la base aérienne de Kirtland, au Nouveau-Mexique. Un laser dynamique à gaz, utilisant un télescope pour viser et pointer, abattit un avion téléguidé, qui volait cependant à basse vitesse. Par la suite, en 1978, un laser au fluorure de deutérium abattit trois missiles antichars TOW volant à 500 milles à l'heure. Cependant, il lui fallut huit tentatives pour y parvenir ainsi qu'une énorme station génératrice pour produire la puissance de sortie de 300 watts requise. Néanmoins, il semblerait que l'on puisse passer bientôt à l'espace.

Par contre, les AED à faisceaux de particules ne sont pas aussi avancées. Elles offrent le grand avantage que le faisceau n'a pas à «couper» à travers le missile; il lui suffit d'interférer avec ses circuits de guidage (bien qu'en fonctionnement réel un faisceau augmenterait certainement la température du missile).

Comme pour les lasers, il y a des moyens de défense contre les faisceaux de particules ainsi que des problèmes inhérents à leur fonctionnement. Tout faisceau de particules (électrons, protons, neutrons, etc.) a tendance à diverger à cause des charges électriques des composants individuels, bien que les faisceaux à neutrons soient moins sensibles à cet effet. Par ailleurs, les distorsions du champ géomagnétique déformeraient complètement la trajectoire du faisceau. Dans l'espace, une AED contre les missiles balistiques aurait besoin d'un système de pointage radar, qui pourrait être brouillé ou induit en erreur par des bandelettes anti-radar ou des leurres. Il est également possible de faire exploser une arme nucléaire dans l'atmosphère afin de bloquer les voies de propagation d'un faisceau. Comme c'est le cas pour la plupart des armes, il semblerait que tout progrès dans le domaine offensif se traduise par un progrès sur le plan défensif.

Malgré ces problèmes, la DARPA mène actuellement le programme de technologie des faisceaux de particules, chargé de produire la technologie requise d'ici 1987. L'une de ses tâches est la «génération de faisceaux neutres à faible divergence pour applications spatiales». Il s'agit ici évidemment d'un système AED ASAT.[21]

L'URSS semble elle aussi être engagée dans la recherche des faisceaux de particules aux fins des armes spatiales.[22]

Les États-Unis comme l'Union soviétique possèdent des véhicules spatiaux réutilisables. Malgré ses problèmes de développement, le programme de la navette spatiale américaine est très réussi. L'Albatros soviétique (ou Raketoplan) a également connu un certain succès, bien qu'il n'ait pas fait l'objet de trop de publicité. Les deux véhicules peuvent mettre en orbite des charges utiles et peuvent intercepter des satellites aux fins d'inspection. Ce dernier point est très important sur le plan militaire.[23]

Vu le caractère délicat et fragile d'un satellite en tant que charge utile, tout écart par rapport à une efficacité de 100% peut être désastreux. Par conséquent, les systèmes ASAT n'ont pas besoin d'être très sophistiqués : la simple collision avec un missile ASAT «non armé» serait probablement suffisante.

---

21 On a beaucoup écrit au sujet du développement des armes à faisceau de particules. Un article facile à lire est celui de Parmentola, J. et Tsipis, K., "Particle Beam Weapons", *Scientific American*, v. 290, nº 4, 1979, pp. 54-65. Il offre une excellente description de la technologie ainsi que des renseignements utiles sur les points faibles de cette arme. Les auteurs attribuent cependant une importance secondaire aux intenses recherches consacrées actuellement à la mise au point des AED. Bien qu'une certaine prudence soit souhaitable lorsqu'on parle de la mise au point des AED, il faut également reconnaître les progrès réalisés au cours de cette dernière décennie. De toute évidence, la réalisation des armes AED devient une possibilité de plus en plus réelle.

22 Main, R., *op. cit.*, note 20.

23 Voir des détails sur la navette soviétique dans Covault, C. "Soviets Orbit Shuttle Vehicle", *Aviation Week and Space Technology*, 14 juin 1982, pp. 18-19. Voir également Humble, R.A. "The Soviet Space Shuttle and Related Military Developments", *Canadian Defence Quarterly*, v. 12, nº 3, 1982-83, pp. 30-33.

Les Soviétiques sont beaucoup plus avancés que les Américains en matière de technologie ASAT. En 1976, ils ont commencé une série de tests de «satellites tueurs» utilisant des «grenades surdimensionnées» avec un système de recherche de cibles, capables d'intercepter une cible dans l'espace. En 1981, les caméras de poursuite hautement classifiées TEAL BLUE et TEAL AMBER (du système GEODSS avancé) auraient photographié des tubes de lancement ASAT sur le Cosmos 1267 qui est venu s'arrimer au *Salyut 6*. Cette opération est à l'origine de rumeurs selon lesquelles les Soviétiques se prépareraient à exploiter un «poste de combat» anti-satellite en orbite.[24]

Les États-Unis développent une capacité ASAT en réponse aux systèmes soviétiques, mais en se servant d'une technologie différente. Le 21 janvier 1984, un chasseur F-15 a lancé dans l'espace, au-dessus du polygone d'essai de la *USAF* dans l'ouest du pays, un missile d'attaque à courte portée (SRAM = *Short-Range Attack Missile*) à deux étages afin de tester son système de guidage.[25]

Malgré cette évolution, il est peu probable que l'ère des plates-formes de combat spatiales (les «Étoiles de la mort») ait déjà commencé. Néanmoins, de grandes bases ASAT se trouvent probablement au stade de la planification aux États-Unis comme en Union soviétique. On sait par exemple que les Soviétiques s'orientent vers une station spatiale permanente. Desservie par le «remorqueur» non habité *Progrès*, elle pourrait être une adaptation du «module de station spatiale» *Cosmos 1267*. Le nouveau véhicule *Soyouz-T* servirait au transport des équipages.[26] Certains prétendent que le «module» n'est qu'une «façade» cachant une énorme station ASAT. D'après le groupe amateur de Kettering, la télémétrie provenant du Cosmos 1267 est d'un type jamais vu auparavant dans le cadre d'autres vols de Cosmos.

Enfin, la rumeur, singulière, veut que les Soviétiques aient mis au point une énorme installation à faisceau de particules pour se défendre contre les missiles balistiques intercontinentaux américains. D'après des sources provenant des services de renseignement de la *USAF*, une base secrète aurait été construite à Semipalatinsk, au Kazakhstan. Une sphère d'acier de grande dimension, branchée sur un générateur magnétohydrodynamique, se trouverait enfouie à une grande profondeur dans le sol. On prétend qu'un petit dispositif nucléaire pourrait être déclenché dans cette sphère, son énergie étant transférée par l'intermédiaire du générateur vers un accélérateur qui produirait un faisceau de protons. Du point de vue de la physique, ce système n'est pas impossible; il dépasse cependant les capacités actuelles. Pourtant, la stratégie menant à l'emploi d'un tel système semble mal fondée, puisqu'il serait vulnérable à de nombreuses contre-mesures. De plus, une arme à faisceau ayant pour source de puissance une «bombe nucléaire» produit un flux de protons inutilement fort, selon les critiques (qui ne tiennent peut-être pas compte cependant du fait qu'un faisceau très puissant offrirait plusieurs avantages par rapport à un faisceau produit par des moyens plus classiques).[27] Tel que mentionné auparavant, même s'il est théoriquement possible de placer un tel système à bord d'un satellite, le satellite lui-même serait extrêmement vulnérable aux armes ASAT.

[24] Powell, J.W. "Photography of Orbiting Satellites", *Spaceflight*, v. 25, nº 2, 1983, pp. 82-83.

[25] Le test ASAT a été signalé dans *Aviation Week and Space Technology*, 30 janv. 1984, p. 19.

[26] Un bon aperçu sur l'évolution spatiale chez les Soviétiques est celui donné par Oberg, J. "Soviet Developments Point for Space Operations Center", *Astronautics and Aeronautics*, mai 1982, pp. 74-77.

[27] Douglas, J.H. et Thomsen, D.E. "The Great Russian 'Death-Beam' Flap", *Science News*, v. 111, 21 mai 1977, pp. 329-335.

Chapitre sept

Vérification des systèmes spatiaux

Il y a plusieurs accords internationaux en vigueur à l'heure actuelle qui ont trait directement et explicitement à l'utilisation militaire de l'espace[28]. Le premier accord d'importance a été signé en 1963. Habituellement appelé le *Traité sur l'interdiction partielle des essais nucléaires*, il interdit de faire exploser un engin nucléaire (entre autres) dans l'espace extra-atmosphérique (Article 1). Jusqu'à présent, ce traité a été ratifié par environ 111 pays.

Le *Traité sur l'espace extra-atmosphérique*, signé en 1967, interdit de placer en orbite terrestre des «armes nucléaires ou autres armes de destruction de masse». Cet accord, de première importance, interdit également «l'aménagement de bases, d'installations militaires et de fortifications, les essais d'armes de tous types et l'exécution de manœuvres militaires sur les corps célestes». Le *Traité sur l'espace extra-atmosphérique* compte aujourd'hui environ 92 pays adhérents.

La *Convention sur la modification de l'environnement*, signée en 1977, interdit tout changement hostile des processus naturels, y compris ceux de l'espace extra-atmosphérique, qui entraînerait des répercussions de grandes dimensions, de longue durée ou graves (Articles I et II). Environ 54 États ont signé cette entente.

Les traités susmentionnés sont tous des accords multilatéraux. Il existe un traité bilatéral conclu entre les États-Unis et l'URSS qui a directement rapport à l'espace extra-atmosphérique, soit le *Traité sur la limitation des systèmes de missiles antimissiles*, signé en 1972. En vertu de cet accord, chaque partie «s'engage à ne pas mettre au point, faire l'essai ou déployer des systèmes de missiles antimissiles ou composantes à partir d'une base sur la mer, dans l'air, *dans l'espace* ou d'une base terrestre mobile» (Article I).

Bien sûr, même si divers traités sont légalement en vigueur, il n'est pas dit qu'ils soient tous respectés. Par exemple, il est actuellement difficile de vérifier le *Traité sur l'espace extra-atmosphérique*. Il se peut qu'une arme nucléaire non annoncée, et donc inconnue, se trouve en orbite à l'heure actuelle.

Toutefois, l'emploi de GEODSS et d'autres systèmes d'inspection des satellites modifie peu à peu cette situation. Au moyen de systèmes optiques terrestres, on peut observer les satellites en orbite et discerner leurs détails. De plus, les radiomètres des stations GEODSS peuvent détecter l'émission ou les fuites de rayonnement en provenance de satellites en orbite, et vérifier ainsi les mécanismes de production d'énergie ainsi que leur état de fonctionnement.[29] Les versions améliorées des systèmes GEODSS tels que le capteur TEAL AMBER seront non seulement plus rapides, mais aussi plus sensibles aux objets peu brillants dans l'espace. Par ailleurs, chaque année voit la mise au point de nouveaux systèmes.

Les observations à partir de la terre dépassent maintenant,et de loin, la portée des systèmes astronomiques avancés. Au Moyen-Orient, un système radar de la DARPA est apparemment capable de reproduire l'image même de satellites à faible altitude.[30] On prétend la même chose au sujet du radar «Haystack» du MIT, à Lexington, au Massachusetts.

---

28 Un excellent aperçu des armes dans l'espace et de leur pertinence en ce qui concerne les accords sur le contrôle des armements est donné par Lindsey, G.R. "The Military Uses of Outer Space and Arms Control", *Canadian Defence Quarterly*, v. 13, nº 1, 1983, pp. 9-14. Pour une étude détaillée de la loi pertinente au contrôle des armes dans l'espace extra-atmosphérique, voir le document de travail présenté à la Conférence sur le désarmement sous le titre «Étude de la loi internationale pertinente au contrôle des armes et à l'espace extra-atmosphérique CD/618, 23 juillet 1985.

29 McNamara, F.L. et Krag, W.E., *op.cit.*

30 Karas, T. *op.cit.*

À l'installation de poursuite et d'identification optique de Maui (MOTIF = *Maui Optical Tracking and Identification Facility*), située à Hawaii, un système lidar (où la lumière remplace les ondes radio) utilise un «télescope compensé formateur d'images» pour maximiser l'information reçue grâce à l'analyse de ses capteurs passifs et actifs.

On se sert également, pour observer les satellites, de systèmes de reconnaissance basés dans l'espace. Ces premiers systèmes, qui ont vu le jour au cours des années 1960, étaient destinés à des missions d'observation du sol. Lorsque Eisenhower a proposé le programme «Open Skies», qui visait prétendument à assurer une vérification sans désarmement, les Soviétiques l'ont refusé de manière catégorique. Cela se passait en 1955, à la Conférence au sommet de Genève, une année seulement avant que les avions-espions U-2 ne commencent à survoler la Russie. Plus tard, en 1960, lorsqu'on mit fin aux opérations des U-2, le *Discoverer 13*, premier «satellite espion», renvoyait des photographies de la Terre.[31]

Les satellites de reconnaissance ont fait d'énormes progrès depuis lors. En 1971, on a lancé le premier satellite *Big Bird*. À partir de son orbite polaire, il renvoit vers la terre des images de télévision ainsi que des capsules de film. *Big Bird* vole à un périhélie d'environ 150 km, altitude qui demeure plus élevée que celle de certains satellites plus petits lancés pour examiner une région précise du globe.[32]

Une série très secrète de satellites portant le nom de KH-11 revêt une importance stratégique plus grande que la série des *Big Bird*. Le premier de ces satellites a été lancé en 1978 et a un périhélie plus élevé (environ 250 km), et donc une durée de vie plus longue que le satellite *Big Bird*. Les KH-11 sont dotés de capteurs électro-optiques du type GEODSS ayant un pouvoir de résolution extrêmement élevé. On estime que probablement les KH-11 sont aussi munis de capteurs infrarouges sophistiqués permettant «d'observer» les bases de missiles souterraines. Les satellites *Big Bird* peuvent éjecter des colis de données, qui sont captés par des filets remorqués par des avions. D'autre part, les KH-11 transmettent leurs données à des stations terrestres comme celles de Thulé ou de Guam, ou encore à des satellites du programme de soutien à la défense (DSP = *Defense Support Program*), en orbite plus haute, pour traitement et retransmission ultérieurs.[33]

De plus, il existe des satellites ELINT (renseignements électroniques) VHF Rhyolite pour la surveillance des communications, ainsi que des satellites Vela Hotel pour la surveillance des émissions radioactives.

L'observation d'un satellite par un autre a peut-être déjà été réalisée. Lorque la première navette spatiale a perdu quelques tuiles de son bouclier thermique lors du lancement, on a fait appel aux stations GEODSS pour examiner en détail le bouclier, et on l'a fait examiner également par des satellites *Big Bird* ou KH-11 à partir de leur orbite.[34] Il est raisonnable de supposer que l'observation d'autres satellites pourrait se faire de manière régulière par des systèmes tels que les KH-11.

L'idée d'avoir recours à des satellites pour vérifier les activités d'autres satellites, n'a rien de nouveau. Par exemple, dès 1960, les États-Unis avaient créé des intercepteurs pour l'inspection des satellites (SAINT). Le but de ce programme avait deux volets : 1) l'inspection des satellites par d'autres satellites à faible distance et 2) l'interception effective de satellites par d'autres satellites. Ce premier système ASAT pratique a été éliminé pour diverses raisons, dont la possibilité que les satellites «ennemis» soient «piégés» de manière à éviter une inspec-

31 Steinberg, G.M. *Satellite Reconnaissance*, Praeger Publishers, N.Y., N.Y., 1983.

32 Karas, T. *op.cit.*

33 *Ibid.*

34 Hoagland, R.C. "Superspy in Orbit", *Science Digest*, v. 89, nº 6, juillet 1981, p. 32.

Chapitre huit

Sommaire

tion rapprochée. De plus, l'inspection par l'une des parties encouragerait l'autre partie à faire de même, ce qui pourrait ne pas être souhaitable.

(En ce qui concerne les satellites «piégés», mentionnons le *Salyut 6*, qui possède apparemment des «tubes de missiles» ASAT. Ces tubes de 1 mètre sont exceptionnellement petits pour un système ASAT offensif, mais on estime qu'ils sont expérimentaux. Cependant, le sujet des «mines spatiales» a fait l'objet de mentions dans les ouvrages sur les armes ASAT, et on doit tenir compte de la possibilité que ces tubes soient des lance-mines à vocation *défensive*).[35]

Puisque les systèmes actuels de satellites de reconnaissance sont conçus pour inspecter les régions sensibles tant sur terre que dans l'espace, et puisqu'ils se trouvent généralement en orbite basse, ils constituent des cibles de choix pour les dispositifs ASAT. Qu'il suffise de songer à l'incident de l'U-2 pour se rendre compte de la situation précaire des missions de reconnaissance. Face au développement des armes ASAT, une répétition de cet incident dans l'espace devient possible. En réalité, il se peut qu'elle se soit déjà produite : on a soupçonné qu'un laser soviétique terrestre avait «aveuglé» un satellite de reconnaissance américain, bien que des rapports ultérieurs aient «identifié» la cause comme étant des incendies de gaz dans le Golfe Persique.[36]

À l'avenir, puisque le radar basé sur terre est limité aux satellites en orbite basse et que le GEODSS est limité au visionnement de nuit par ciel clair, il faudra peut-être un système entièrement nouveau. Celui-ci pourrait être composé de systèmes optiques interorbitaux basés dans l'espace et de lidars basés sur terre.

La course aux armements et la concurrence militaire peuvent entraîner des situations fortement déstabilisatrices et dangereuses. Cependant, on peut améliorer la stabilité stratégique en adoptant, en matière de contrôle des armements, des traités qui comportent des procédures de vérification efficaces. Toute proposition raisonnable doit tendre vers ce but.

L'utilisation des méthodes astronomiques dans les stratégies de vérification des systèmes d'armes spatiales est prometteuse. Depuis le lancement des premiers satellites vers la fin des années 1950, la défense militaire a accordé une forte priorité à leur observation et à leur poursuite. Exécutée d'abord dans le cadre du programme civil MOONWATCH, cette fonction a été modernisée à la hâte au moyen de stations dotées de caméras Baker-Nunn. Dès que ces dernières sont entrées en exploitation, il devint évident qu'elles n'étaient pas encore satisfaisantes, car elles ne permettaient pas d'obtenir des données en temps réel.

Ce fut ensuite au tour des observations photométriques, dont la technologie avait été empruntée directement à l'astronomie. On mit ensuite au point des systèmes électro-optiques en direct, ce qui améliorait à la fois la résolution et la capacité d'exploitation en temps réel. Tout au long de la mise au point des capteurs aux fins de la poursuite, les instruments et la technologie utilisés ont été essentiellement de nature astronomique. On en est arrivé maintenant à un point, cependant, où la technologie de l'astronomie militaire a devancé celle de l'astronomie civile. En fait, des astronomes ont demandé que les stations GEODSS soient dotées de «boîtes noires» afin d'emmagasiner des données stellaires pour transfert ultérieur à des disques lasers et pour diffusion aux établissements astronomiques. Des études d'astéroïdes ont également été effectuées avec un certain succès à l'aide du matériel GEODSS.

La surveillance optique des satellites est un élément absolument essentiel du système NORAD SPACETRACK. Le maintien d'un

35 Oberg, J. "Soviet Developments Point for Space Operations Center", *Astronautics and Aeronautics*, mai 1982, pp. 74-77.

36 Main, R., *op. cit.*, note 20.

répertoire précis des satellites répond aux besoins des agences de télécommunication civiles, mais aussi à ceux, très réels, de la poursuite militaire. Comme la précision du radar se limite à une altitude d'environ 5 000 kilomètres, il faut des systèmes optiques pour les satellites en orbite haute. Le GEODSS vient ainsi combler une lacune des systèmes de surveillance. Le capteur TEAL AMBER et ses générations futures vont fortement améliorer la résolution au cours de la prochaine décennie, tandis que l'emploi de systèmes actifs, tels que la poursuite des satellites au moyen de lidars, pourrait appuyer davantage les observations.

La poursuite des satellites revêt aujourd'hui une importance accrue à mesure que l'on comprend l'incidence des systèmes ASAT. L'observation des manœuvres des satellites peut fournir des renseignements sur le déroulement des missions militaires dans l'espace. Ces observations peuvent permettre aux groupes de vérification de savoir dans quelle mesure se fait la militarisation de l'espace.

Si le concept de la vérification des systèmes spatiaux mérite qu'on s'y attarde, il faut mettre au point d'autres méthodes pour les détecteurs basés sur la Terre. Du point de vue purement astronomique, la suggestion voulant que les stations GEODSS transfèrent leurs données stellaires est intéressante. Cependant, un groupe de vérification par satellite pourrait également se servir des données de poursuite. Un groupe indépendant pourrait alors analyser les données de poursuite pour déceler toute activité spatiale inusitée ou non justifiée, sous réserve, bien sûr, qu'on soit d'accord pour fournir ces informations. Sinon, la technologie étant disponible, on pourrait construire des capteurs GEODSS indépendants.

La caméra Baker-Nunn de Cold Lake, en Alberta, qui vient d'être mise hors service à cause de son incapacité à fournir des données en temps réel, a été donnée à l'Université de Calgary, où elle doit servir à des fins astronomiques. Si d'autres systèmes Baker-Nunn étaient remplacés par des systèmes électro-optiques ayant une capacité de données en temps quasi réel, les caméras Baker-Nunn pourraient alors être mises à la disposition des établissements astronomiques ou réservées à une éventuelle utilisation par des groupes de vérification.

N'oublions pas de mentionner l'existence possible d'un catalogue des observations satellite-à-satellite. Si l'on permettait à un groupe de vérification d'avoir accès, même partiellement, à un tel catalogue aux fins d'inspection et de vérification de la vocation d'un satellite, les conséquences pour le contrôle des armements seraient fort valables. Si ces données étaient communiquées de manière bilatérale, l'effet en serait intrinsèquement stabilisateur.

En ce qui concerne la vérification des accords de contrôle, on a fait de nombreuses propositions qui faisaient appel aux satellites de reconnaissance et à d'autres types de systèmes spatiaux, au cours des négociations sur les armements. Cette gamme allait de l'utilisation de satellites de reconnaissance pour détecter la construction des bases de missiles, jusqu'à l'inspection effective, sur les lieux, des plates-formes de lancement. Cela montre bien la valeur des systèmes spatiaux pour le contrôle des armements.

Chapitre neuf

Le Canada et les systèmes de vérification de l'espace à partir de bases terrestres

À l'heure actuelle, il existe au Canada une station de poursuite électro-optique, soit celle de St. Margaret, au Nouveau-Brunswick. Bien qu'il ne s'agisse pas d'une véritable station GEODSS, elle possède nombre des fonctions GEODSS et ses données servent à mettre à jour le catalogue des satellites tenu par le NORAD. Bien qu'il y ait plusieurs stations GEODSS dans le monde, la capacité qu'ont certains satellites de changer rapidement d'orbite pour des manœuvres offensives semble indiquer que des stations supplémentaires seraient souhaitables en vue d'une poursuite précise en temps réel. Au moins une station GEODSS (ou de type GEODSS) supplémentaire pourrait être installée au Canada. L'endroit choisi serait fonction du besoin d'un nombre maximum d'heures de ciel découvert pour faciliter la poursuite optique. Les régions du pays ayant le plus grand nombre moyen d'heures de ciel découvert chaque année sont les Prairies, et surtout les parties les plus au sud de l'Alberta, de la Saskatchewan et du Manitoba. Ces régions comptent jusqu'à 25% de plus d'heures de ciel découvert que le Nouveau-Brunswick. On pourrait peut-être moderniser la station de Cold Lake, bien qu'un emplacement plus au sud pourrait être meilleur. Une autre possibilité, vu le risque d'activités au-dessus de la région polaire, serait les Territoires du Nord-Ouest. Cependant, si l'on considère que de nombreux satellites ont des orbites qui les amènent au-dessus de la côte est de l'Amérique du Nord, on pourrait proposer un emplacement supplémentaire dans l'Est, bien que le site de St. Margaret pourrait facilement s'occuper du trafic, une fois modernisé. Dans tous les cas, si des systèmes GEODSS supplémentaires sont installés, le fardeau des stations actuelles serait allégé et la précision des données reçues augmenterait.

On pourrait élargir la portée des propositions sur la vérification par satellite pour y inclure les systèmes de poursuite GEODSS, radar, lidar ou autres. Bientôt, un système de satellites pourra peut-être détecter des avions isolés. Sa capacité de localiser les vols ASAT stabiliserait certes davantage la situation en ce qui concerne le contrôle des armements basés dans l'espace. Ces renseignements seraient également précieux pour les systèmes de vérification.

La vérification du contrôle des armements va au cœur de tout accord visant un système de contrôle des armements parce qu'elle touche en même temps à l'observation et à la confiance. En ce qui concerne l'espace extra-atmosphérique, il est clair qu'il faudrait examiner de manière critique la question de nouveaux types de vérification multilatérale. Cette étude reconnaît que la mise en application de techniques de détection à distance, à partir de bases terrestres, au problème de vérification du contrôle des armements ne constitue pas un système viable en lui-même et de par lui-même. Il peut toutefois représenter un élément efficace dans un système intégré. Le Canada semble être bien placé pour contribuer de manière significative aux discussions portant sur la vérification dans l'espace extra-atmosphérique. Il possède les moyens techniques et l'expertise nécessaires pour concevoir et faire fonctionner un système de vérification basé dans l'espace. Il peut également contribuer considérablement aux études de vérification à partir d'une base terrestre, à l'échelle internationale. En outre, le Canada dispose des moyens techniques, de la main-d'œuvre et des installations voulues pour être en mesure de poursuivre ces objectifs sur une longue période. L'astronomie est un de ses atouts scientifiques les plus précieux. On pourrait y avoir recours pour collaborer sur le plan conceptuel et pratique, à la recherche ayant trait à la vérification de l'espace extra-atmosphérique. Cela dépendra en grande partie des probabilités de ratification de traités d'importance par les États disposant des ressources voulues dans l'espace et jusqu'à quel point le Canada est déterminé à poursuivre sa collaboration dans le développement de ses capacités en matière de vérification, étant donné l'évolution rapide de l'utilisation de l'espace.

Annexe 1 : Stations de poursuite des satellites dans le fichier GEODSS

Annexe 2 : Principaux établissements astronomiques au Canada

Colombie-Britannique

- Observatoire radio-astronomique Dominion, Conseil national de la recherche, Penticton; réflecteur de 26 mètres.
- Observatoire astrophysique Dominion, Victoria; réflecteur de 1,75 mètre.

Ontario

- Observatoire radio Algonquin, Lake Traverse;
- Observatoire David Dunlap, Richmond Hill; réflecteur de 1,8 mètre.

Québec

- Observatoire du Mont Mégantic, comté de Compton; réflecteur de 1,6 mètre.

Nouvelle-Écosse

- Observatoire Burke-Gaffney, Halifax.

.....

En plus des établissements professionnels, il y a un certain nombre d'observatoires d'amateurs («amateurs» uniquement au sens où ils participent à des recherches non institutionnelles; la qualité du travail n'est pas en cause). La Société royale d'astronomie du Canada a 2 600 membres, partout au pays, et possède 20 centres dans les principales villes. La plupart des centres possèdent des observatoires opérationnels avec des télescopes petits ou moyens. De plus, de nombreux adhérents ont leurs propres instruments. On estime que le nombre de télescopes exploités à un moment donné par des membres de la Société varie de 500 à 750. Par ailleurs, la plupart des grandes universités possèdent au moins quelques télescopes. Pour obtenir des renseignements supplémentaires sur les instruments canadiens, consulter : Gall, J. Astronomical Directory, Gall Publications, Toronto, 1978, pp. 13–17.

Étude sur la vérification du contrôle des armements

n° 1 *Document de travail théorique sur le concept de vérification de la limitation des armements*, par F.R. Clemenson et E. Gilman, janvier 1986